



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง อิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของ
ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์

Influence of Processing Parameters on Weldline Strength of Natural Rubber
Molded Parts

نامผู้วิจัย นายธนวัฒน์ ตั้งเขื่อนขันธุ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์อัญชนา วงษ์ไต่, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์จิระชัย มิ่งบรรเจ็ดสุข, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์สมเจตน์ พิชร์พันธ์, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสาน
ของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์

Influence of Processing Parameters on Weldline Strength of
Natural Rubber Molded Parts

โดย

นายธนวัฒน์ ตั้งเขื่อนขันธุ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2554

ธนวัฒน์ ตั้งเชื่อนันท์ 2554: อิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความแข็งแรง
รอยประสานของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์อัญญา วงษ์โต, Ph.D. 91 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติม ระบบการคงรูป และปัจจัยใน
กระบวนการผลิต ที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติเมื่อผ่านกระบวนการอัดและ
กระบวนการฉีดขึ้นรูป นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ตำแหน่งของรอยประสานที่เกิดขึ้นภายใน
แม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม จากผลการทดสอบความแข็งแรง
ของรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปพบว่าการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ส่งผลต่อความ
แข็งแรงรอยประสาน ในขณะที่การผสมซิลิกาและเขม่าดำ ส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยประสานมี
ค่าลดลงอย่างมาก ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากร่องบากรูปตัววี โพรงอากาศ และการจัดเรียงตัวของสายโซ่
โมเลกุล รวมถึงการแพร่ข้ามที่ไม่สมบูรณ์ของสายโซ่โมเลกุลบริเวณรอยประสาน จากผลการทดสอบ
อิทธิพลของระบบการคงรูปที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติ ภายหลังจากการบ่ม
เร่งด้วยความร้อน พบว่ายางธรรมชาติที่ใช้ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ มีความแข็งแรงรอย
ประสานที่มากกว่าระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม หากพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการอัดขึ้น
รูปพบว่าการเพิ่มแรงดันปิดแม่พิมพ์ส่งผลให้ความแข็งแรงรอยประสานแบบเย็นมีแนวโน้มเพิ่มมาก
ขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงที่ได้ อย่างไรก็ตาม จากผลการ
ทดสอบความแข็งแรงรอยประสานแบบเย็นและแบบร้อนของยางธรรมชาติที่ได้จากกระบวนการฉีด
ขึ้นรูป พบว่าความแข็งแรงรอยประสานแบบเย็นมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์ฉีดเพิ่มสูงขึ้น
ซึ่งให้ผลที่แตกต่างจากรอยประสานแบบร้อนที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิแม่พิมพ์และ
ระยะทางภายหลังจากไหลผ่านอินเลอร์ จากผลการวิเคราะห์รูปแบบการไหลและตำแหน่งการเกิด
รอยประสานของยางภายในแม่พิมพ์ ที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์การไหลและแบบจำลองเครือข่าย
ประสาทเทียม พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง อย่างไรก็ตามยังคงมี
ความแตกต่างของรูปร่างการไหลและตำแหน่งของรอยประสานที่เกิดขึ้น ทั้งนี้นอกเหนือจากจำนวน
ข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่อาจไม่เพียงพอ ยังอาจมีสาเหตุมาจาก
สมมุติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แตกต่างจากความเป็นจริง

Tanawat Tungkeunkunt 2011: Influence of Processing Parameters on Weldline Strength of Natural Rubber Molded Parts. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Ms. Anchana Wongsto, Ph.D. 91 pages.

The objective of this work was to investigate primarily the influences of filler type and content, vulcanizing system, and processing parameter on the weldline strength of natural rubber (NR) molded by compression and injection molding processes. In addition, the computer aided engineering (CAE) programs (i.e. Cadmould and Neurosolution) were also employed in order to predict the flow pattern and weldline location within the mold. The results obtained from compression molded NR indicated that the weldline strength decreased with increasing silica and carbon black contents, while no significant change in weldline strength was observed for the loading of calcium carbonate. The reduction of weldline strength was due to the perpendicular orientation of molecular chains, the lack of intermolecular diffusion, and the occurrences of V-notch and micro-voids at the weldline interface. It can be seen that, after the thermal aging test, the weldline strength of NR vulcanized by conventional vulcanization (CV) was lower than that of efficient vulcanization (EV). Considering the effect of processing parameters, it was found that the weldline strength increased with increasing clamping pressure, while the increase of mold temperature did not produce any major changes in weldline strength. Furthermore, the mechanical results obtained from different types of weldline (i.e. hot and cold weldlines) which was produced by injection molding also indicated that the strength of cold weldline decreased with increasing mold temperature. In the case of hot weldline, however, the increase of weldline strength was found with the increases of mold temperature and flow distance behind an obstacle. The flow pattern and weldline location predicted by computer programs were found to agree reasonably well with corresponding experiments. The differences in the findings may result from the assumptions and insufficient data used in the calculation.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณอาจารย์อัญญา วงษ์โค ประธาน
กรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษา ตลอดจนการให้ความช่วยเหลือแก้ไขปัญหาต่างๆ
ขอขอบพระคุณ อาจารย์สมเจตน์ พชรพันธ์ กรรมการที่ปรึกษาร่วม ที่ได้คำแนะนำ และความ
ช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ระชัย มีบรรเจิดสุข และอาจารย์นุชนาฏ ณ ระนอง เป็นอย่างสูงที่
ได้ให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบพระคุณสำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร
กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในหัวข้อ “การศึกษา
อิทธิพลของรอยประสานที่มีต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อัดและแม่พิมพ์
ฉีด”

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่าย 5 อุดสาหกรรมที่ได้ให้ทุน
สนับสนุนการวิจัยในส่วนการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ในโครงการวิจัยขนาดกลาง
เรื่องยางพารา (Medium Project of Rubber, MPR) หัวข้อเรื่อง “การทำนายตำแหน่งรอยประสาน
ของชิ้นงานยางในกระบวนการอัดขึ้นรูปโดยใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม”

ขอขอบคุณ คุณวัชรพงษ์ ชูแก้ว นักวิจัยของกลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตยางและ
พลาสติก (Plastic and Rubber Processing Research; PaRP-Group) เพื่อนๆ และน้องๆ ในกลุ่ม ที่ให้
ความช่วยเหลือทุกๆ ด้าน จนงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บิดา มารดา ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจมาตลอด ข้าพเจ้าหวัง
เป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะสามารถนำไปใช้เพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจและประเทศชาติได้เป็น
อย่างดี

ธนวัฒน์ ตั้งเขื่อนขันธุ์
ธันวาคม 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	32
อุปกรณ์	32
วิธีการ	34
ผลและวิจารณ์	49
สรุปและข้อเสนอแนะ	70
สรุป	70
ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	73
ภาคผนวก	81
ภาคผนวก ก สมบัติของยางก่อนการคงรูป	82
ภาคผนวก ข ผลทดสอบความแข็งแรงของรอยประสานโดยกระบวนการอัดขึ้นรูป	85
ภาคผนวก ค ผลทดสอบความแข็งแรงของรอยประสานโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป	88
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	91

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 เกรดของยางธรรมชาติที่ใช้ในอุตสาหกรรม	5
2 อัตราส่วนระหว่างสารเร่งกับกำมะถันในระบบต่างๆ	7
3 สูตรยางที่ใช้ในงานวิจัย	35
4 ผลการวิเคราะห์เพื่อหาสถาปัตยกรรมเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม	65
5 ผลการวิเคราะห์เพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกหัดที่เหมาะสมในการสอนเครือข่ายประสาทเทียม	66
6 ผลการวิเคราะห์เพื่อหาจำนวนชั้นซ่อนที่เหมาะสม	67
7 ผลการวิเคราะห์หาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม	68
ตารางผนวกที่	
ก1 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลและสมบัติการคงรูปเมื่อบดผสมเข้ากับยางธรรมชาติ	83
ก2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการคงรูปเมื่อบดผสมเข้ากับยางธรรมชาติ	83
ก3 อิทธิพลของระบบการคงรูปต่อสมบัติการคงรูปเมื่อบดผสมเข้ากับยางธรรมชาติ	84
ข1 อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป	86
ข2 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป	86
ข3 อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป	86
ข4 อิทธิพลของระบบการคงรูปและการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป	87
ข5 อิทธิพลของแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป	87

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข6 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติ ที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป	87
ค1 อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่ มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านในกระบวนการฉีดขึ้นรูป	89
ค2 อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มี รอยประสานเมื่อผ่านในกระบวนการฉีดขึ้นรูป	89
ค3 อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มี รอยประสานเมื่อผ่านในกระบวนการฉีดขึ้นรูป	89
ค4 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่ไม่มีและมี รอยประสานแบบเย็นเมื่อผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป	90
ค5 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์และระยะทางในการไหลที่มีต่อความแข็งแรงรอย ประสานร้อนในกระบวนการฉีดขึ้นรูป	90

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างยางธรรมชาติ	4
2 รูปแบบการเชื่อมขวางระหว่างกำมะถันและยาง	7
3 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อสมบัติของยาง	9
4 เครื่องบดผสมยาง	13
5 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป	15
6 แม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูป	16
7 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดขึ้นรูป	17
8 สกรูในเครื่องฉีดขึ้นรูป	18
9 ระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์	19
10 ชุดฉีดแม่พิมพ์ฉีด	19
11 รูปแบบของทางวิ่ง	20
12 ชิ้นงานที่ฉีดไม่เต็มเบ้าพิมพ์	21
13 ครีบกาวที่เกิดจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป	22
14 การคงรูปที่ไม่สม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ยางที่มีความหนา	23
15 สาเหตุการเกิดรอยประสาน	24
16 ประเภทของรอยประสาน	25
17 การแบ่งประเภทของรอยประสานโดยใช้มุมปะทะ	25
18 โครงสร้างตาข่าย	27
19 แบบจำลองการทำงานของเครื่องอัดประสาท	28
20 โครงสร้างของเครื่องอัดประสาทเทียม	29
21 เครื่องอัดประสาทเทียมแบบมีการสอน	30
22 แผนผังการวิจัย	34
23 ผลการทดสอบหาเวลาการคงรูปจากเครื่อง MDR	37
24 ขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D412 (Die C)	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
25 แม่พิมพ์อัดที่ออกแบบเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรอยประสาน	39
26 การวางยางคอมพาวด์เริ่มต้น	39
27 ชิ้นงานยางที่มีรอยประสานและชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	40
28 แม่พิมพ์ฉีดที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น	41
29 ชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูป	41
30 ตำแหน่งของชิ้นงานที่นำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด	42
31 ขั้นตอนการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม Cadmould เวอร์ชัน 2.0	43
32 การนำแบบจำลองสามมิติของแม่พิมพ์เข้ามาในโปรแกรม Cadmould	43
33 แบบจำลองหลังการสร้างโครงร่างตาข่าย	44
34 ข้อมูลของวัสดุและตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้วิเคราะห์	44
35 ผลจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Cadmould	45
36 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม	46
37 การเก็บตำแหน่งเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม	47
38 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการเก็บตำแหน่งของรอยประสาน	47
39 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่าความหนืดมูนีของยางธรรมชาติ	50
40 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการคงรูปเมื่อบดผสมเข้ากับยางธรรมชาติ	51
41 อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มียอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป	52
42 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มียอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป	52
43 อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มียอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป	53
44 ภาพถ่ายตัดขวางของชิ้นงานยางธรรมชาติที่บริเวณรอยประสาน	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
45	อิทธิพลของระบบการคงรูปและการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป	56
46	อิทธิพลของแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป	57
47	อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป	57
48	อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านในกระบวนการฉีดขึ้นรูป	59
49	อิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านในกระบวนการฉีดขึ้นรูป	59
50	อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านในกระบวนการฉีดขึ้นรูป	60
51	อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่ไม่มีและมียอยประสานแบบเส้นเมื่อผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป	61
52	อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์และตำแหน่งของรอยประสานร้อนที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยางธรรมชาติ	62
53	มุมมองของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายหลังจากไหลผ่านอินเลอร์	62
54	การพัฒนาารูปแบบการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวและยางภายหลังจากไหลผ่านอินเลอร์ภายในแม่พิมพ์	63
55	ผลเปรียบเทียบการไหลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมและผลจากการฉีดขึ้นรูปจริง	64
56	ผลทดสอบการใช้งานเครื่อง่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง	69

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AU	=	Polyurethane
BR	=	Butadiene Rubber
CaCO ₃	=	Calcium Carbonate
CAD	=	Computer Aided Design
CAE	=	Computer Aided Engineering
CAM	=	Computer Aided Manufacturing
CaSiO ₂	=	Calcium Silicate
CV	=	Conventional Vulcanization
DPG	=	Diphenyl Guanidine
DTDM	=	Dithio Dimorpholine,
DPTT	=	Dipenta Methylene Thiuram Tetrasulphide
EPM	=	Ethylene Propylene Monomer
EV	=	Efficient Vulcanization
EVA	=	Ethylene Vinyl Acetate
IR	=	Polyisoprene Rubber
MgO	=	Magnesium Oxide
NBR	=	Acrylonitrile Butadiene Rubber
NR	=	Natural Rubber
PbO	=	Lead Oxide
PEG	=	Polyethylene Glycol
Phr	=	Part per hundred rubber
SBR	=	Styrene Butadiene Rubber
SCORIM	=	Shear Control Orientation Injection Molding
Semi-EV	=	Semi Efficient Vulcanization
TMTD	=	Tertramethyl Thiuram Disulfide
ZnO	=	Zinc Oxide
θ	=	Contact angle
°C	=	Degree Celsius

อิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสาน ของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์

Influence of Processing Parameters on Weldline Strength of Natural Rubber Molded Parts

คำนำ

การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์เป็นกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกและยางที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากให้อัตราการผลิตสูงและสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรายละเอียดซับซ้อนได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ ยังคงข้อจำกัดที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ คือ รอยประสาน (Weldline) ซึ่งเกิดจากยางหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวมีการไหลมาบรรจบกันภายในแม่พิมพ์ เช่น การฉีดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ จำเป็นต้องใช้ทางเข้ามากกว่าหนึ่งตำแหน่ง (Multiple gates) หรือ ในการอัดขึ้นรูปต้องวางยางคอมพาวด์เริ่มต้นหลายตำแหน่ง (Multiple charges) รวมไปถึงกรณีที่มีการใช้อินเสิร์ต (Insert) หรือสิ่งกีดขวาง (Obstacle) ภายในแม่พิมพ์ นอกจากนี้รอยประสานยังสามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ชิ้นงานมีความหนาผนัง (Wall thickness) ที่แตกต่างกันมาก จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการศึกษาเรื่องความแข็งแรงรอยประสานโดยส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Malguarnera and Manisali, 1981; Fellahi *et al.*, 1995; Selden, 1997) และเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต (Fellahi *et al.*, 1995; Selden, 1997; Patcharaphun *et al.*, 2006; Morelli *et al.*, 2007) ซึ่งการเกิดรอยประสานส่งผลให้ชิ้นงานเกิดรอยตำหนิบนผิวชิ้นงาน และยังทำให้สมบัติเชิงกลลดลงอย่างมาก (Fellahi *et al.*, 1995) ทั้งนี้ในปัจจุบันได้มีการนำคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม (Computer aided engineering, CAE) มาใช้เพื่อช่วยหลีกเลี่ยงรอยประสานให้อยู่ในตำแหน่งที่ไม่สำคัญในกระบวนการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก (Zhai *et al.*, 2006; Deng *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2011) แต่การศึกษาความแข็งแรงตามงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาความแข็งแรงรอยประสานในพอลิเมอร์ประเภทยางยังมีน้อยมาก (Seadan *et al.*, 2002; Chookeaw *et al.*, 2010a; Chookeaw *et al.*, 2010b) โดย Seadan *et al.* (2002) ได้ศึกษาอิทธิพลของแรงดันฉีด (Injection pressure) ความหนืดมูนี (Mooney viscosity) ของยางคอมพาวด์ และปริมาณเขม่าดำที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติ และยางสไตรีนบิวตาไดอีน

(Styrene butadiene rubber, SBR) ในขณะที่ Chookeaw *et al.* (2010a) ได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางอะครีโลไนไตรล์บิวตาไดอิน (Acrylonitrile butadiene rubber, NBR) ที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป นอกจากนี้ยังศึกษาปัจจัยในกระบวนการอัดขึ้นรูปที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติ (Chookeaw *et al.*, 2010b) อย่างไรก็ตามยังคงไม่มีการศึกษาอิทธิพลจากระบบการคงรูป หรืออิทธิพลของรอยประสานที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติม รวมไปถึงปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานที่ผลิตจากยางธรรมชาติ ซึ่งผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) รวมถึงหาแนวทางการใช้โปรแกรมช่วยทางวิศวกรรมในการวิเคราะห์ตำแหน่งของรอยประสานที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน

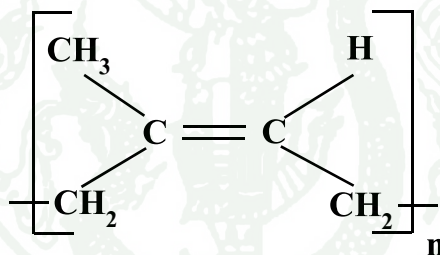
วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานในชิ้นงานที่ผลิตจากยางธรรมชาติซึ่งผ่านกระบวนการฉีด และกระบวนการอัดขึ้นรูป
2. เพื่อศึกษาการใช้โปรแกรมช่วยทางวิศวกรรม (Computer aided engineering, CAE) ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งของรอยประสานที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดขึ้นรูป รวมถึงพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม (Neural network model) เพื่อทำนายตำแหน่งของรอยประสานบนชิ้นงานยางที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

การตรวจเอกสาร

1. ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

ยางธรรมชาติ เป็นผลผลิตจากต้นยางพารา มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* มีต้นกำเนิดจากประเทศบราซิลในทวีปอเมริกาใต้ ก่อนกระจายตัวเข้าสู่ประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ รวมถึงประเทศไทย น้ำยางที่ได้จากต้นยาง มีโครงสร้างทางเคมีที่ประกอบด้วยโมเลกุลของไอโซพรีน (C_5H_8) จำนวนมากต่อกันเป็นสายโซ่โมเลกุล ซึ่งมีการเชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลที่ตำแหน่ง Cis 1-4 ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และอายุของต้นยางพารา ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นด้านสมบัติการต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และการคืนตัว (Rebound) และการต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion) เป็นต้น



ภาพที่ 1 โครงสร้างยางธรรมชาติ

จากโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติที่มีพันธะคู่ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาของรูป (Vulcanization) ได้โดยใช้กำมะถัน อย่างไรก็ตามจากการที่ยางธรรมชาติมีพันธะคู่ในสายโซ่โมเลกุลทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ยางธรรมชาติมีการเสื่อมสภาพ ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารเคมีต่างๆ เพื่อยืดอายุการใช้งานหรือเก็บรักษา เช่น สารเคมีที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidant) และสารเคมีที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับโอโซน (Antiozonant) เป็นต้น ยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกได้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยอัตราการเกิดผลึกมากที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งการเกิดผลึกนี้ทำให้ยางธรรมชาติมีความแข็งแรงและสมบัติความเป็นอีลาสติคที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเกิดผลึกของยางธรรมชาติยังสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อได้รับการยืดดึง (Strain induced crystallization) ทำให้ยางบริเวณนั้นเปลี่ยน

สภาพจากโปร่งแสง (Transparent) ไปเป็นทึบแสง (Opaque) ซึ่งสังเกตได้ง่ายในยางคงรูปที่ไม่มีการเติมเขม่าดำ ปรากฏการณ์ดังกล่าว ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของยางเป็นระเบียบตามทิศทางที่ได้รับแรงดึง โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลึกได้แก่ ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม และอัตราการยืดดึง เป็นต้น (Fuller and Fulton, 1990) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน (Benzene) เฮกเซน (Hexane) และโทลูอีน (Toluene) ทั้งนี้ยางธรรมชาติมีการละลายในตัวทำละลายดังกล่าวลดลงเมื่อผ่านกระบวนการคงรูป เนื่องจากการเกิดพันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ทำให้เกิดปรากฏการณ์เฉพาะเพียงการบวมตัวเท่านั้น

การกำหนดชั้นคุณภาพของยางธรรมชาติที่ผลิตมาในรูปของยางแท่ง เริ่มจากกลุ่มผู้ผลิตยาง (มาเลเซีย อินโดนีเซีย และไทย) จากนั้นจึงมีการกำหนดเป็นมาตรฐานสากล เพื่อให้ประเทศผู้ผลิตรายอื่นๆ ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาคุณภาพและอ้างอิงในการซื้อขาย โดยตารางที่ 1 แสดงถึงคุณสมบัติที่สำคัญและจำเป็นในการกำหนดชั้นคุณภาพของยางแท่งที่ใช้ในปัจจุบัน

ตารางที่ 1 การกำหนดชั้นคุณภาพของยางแท่งตามมาตรฐาน ISO

คุณสมบัติ	เกรดของยาง				
	L	CV	5	10	20
สิ่งเจือปน (%)	0.05	0.05	0.05	0.1	0.2
เถ้า (%)	0.6	0.6	0.6	0.75	1
สารระเหย (%)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ความอ่อนตัว	30	-	30	30	30
ดัชนีการอ่อนตัว	60	60	60	50	40
ดัชนีความแข็ง	6	-	-	-	-
ความหนืดมูนี้	-	60	-	-	-

หมายเหตุ L = Light, CV = Constant viscosity

ที่มา: International Standard Rubber: (2000)

2. การแปรรูปยาง (Rubber processing)

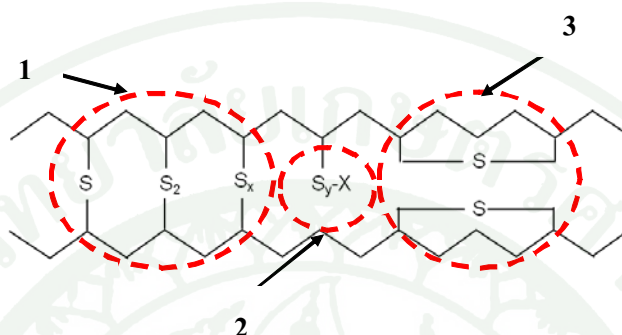
กระบวนการแปรรูปจากยางดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้ ต้องผ่านกระบวนการคงรูปยางหรือกระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) เป็นกระบวนการทางเคมีที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ของยาง (Crosslinking) ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวต้องใช้สารเคมีที่ทำให้เกิดการคงรูป สารเคมีที่ใช้สามารถแบ่งได้เป็น สารทำให้เกิดการคงรูปของยาง (Vulcanizing agents) สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป (Accelerators) นอกจากนั้นอาจมีสารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators) สารตัวเติม (Fillers) และสารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids) และสารเคมีอื่นๆที่ทำหน้าที่เฉพาะด้านเพื่อเสริมสมบัติในการใช้งาน เช่น สารช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพ เนื่องจากแสงและโอโซน เป็นต้น ทั้งนี้สารเคมีดังที่ได้กล่าวมาแล้ว มีอัตราส่วนและลำดับการผสมที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสมบัติที่ต้องการ โดยทั่วไปแล้วสูตรของยางคอมพาวนด์นิยมใช้ในรูปแบบของปริมาณสารต่อยาง 100 ส่วน โดยน้ำหนัก (Part per hundred of rubber by weight, phr) เพื่อความสะดวกในการเตรียมสารเคมี

2.1 สารทำให้เกิดการคงรูป (Vulcanizing agents)

สารทำให้เกิดการคงรูป ทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ของยาง โดยมีความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งทำให้ยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ทั้งนี้สารเคมีที่ช่วยในการคงรูปแบ่งได้เป็น 3 ระบบ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (Sulfur) ระบบที่ใช้สารเคมีซึ่งแตกตัวให้กำมะถัน (Sulfur donor) และระบบที่ใช้สารกลุ่มเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) เวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ปริมาณของสารเคมีที่เกี่ยวข้องในกระบวนการคงรูป อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป และความหนาของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

2.1.1 ระบบการคงรูปโดยใช้กำมะถัน เป็นระบบการคงรูปที่มีการใช้งานมากที่สุด โดยใช้กับยางที่ไม่อิ่มตัว หรือมีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่โพลิเมอร์ เช่น ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene Butadiene Rubber, SBR) ยางพอลิไอโซพรีน (Polyisoprene Rubber, IR) ยางบิวตาไดอีน (Butadiene Rubber, BR) และยางอะคริโลไนไตรล์บิวตาไดอีน (Acrylonitrile Butadiene Rubber, NBR) โดยกำมะถันที่ผสมลงในยางทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ของยาง ซึ่งมีรูปแบบการเกิดดังแสดงในภาพที่ 2 โดยตำแหน่งที่ 1 แสดงการ

เกิดพันธะเชื่อมขวางแบบโมโนซัลฟิดิก (Monosulfidic, -S-) ไดซัลฟิดิก (Disulfidic, -S₂-) และพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic, -S_x-) ตามลำดับ ในขณะที่ตำแหน่ง 2 แสดงการเกิดพันธะเชื่อมขวางแบบเพนเด้นท์ (Pendant sulfur, -S_y-X) และตำแหน่งที่ 3 แสดงการเกิดพันธะเชื่อมขวางภายในสายโซ่เดียวกัน (Intermolecular linkage)



ภาพที่ 2 รูปแบบการเชื่อมขวางระหว่างกำมะถันและยาง

ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบ ได้แก่ ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization, CV) ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi efficient vulcanization, Semi EV) และระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization, EV) โดยในแต่ละระบบมีการใช้ปริมาณกำมะถันและตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในระบบการคงรูป

ระบบการคงรูป	ปริมาณกำมะถัน (phr)	ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป (phr)	อัตราส่วนสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปต่อกำมะถัน
ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม	2.0-3.5	0.4-1.2	0.1-0.6
ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ	1.0-1.7	1.2-2.5	0.7-2.5
ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ	0.4-0.8	2.0-5.0	2.5-12.5

ที่มา: Hofmann (1989)

สมบัติของยางที่ผ่านการคงรูปแต่ละระบบ มีความแตกต่างกัน กล่าวคือ ยางที่ผ่านการคงรูปด้วยระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม มีความต้านทานต่อแรงดึง การกระดอน (Rebound resilience) และ

ความต้านทานต่อการขัดถูที่ดี แต่มีข้อด้อยในด้านความต้านทานการเสื่อมสภาพจากความร้อน (Thermal aging resistance) และความต้านทานต่อการยุบตัวจากแรงอัด (Compression set) เนื่องจากพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นในกระบวนการคงรูปเป็นแบบพอลิซัลไฟด์ ซึ่งมีพลังงานพันธะที่ค่อนข้างต่ำ (ประมาณ 206 kJ/mol) เมื่อเทียบกับพันธะเชื่อมขวางแบบโมโนซัลไฟด์ หรือไดซัลไฟด์ (ประมาณ 279 kJ/mol) ซึ่งเกิดขึ้นในระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ ในขณะที่ยางคงรูปแบบระบบกึ่งประสิทธิภาพ หรือระบบ Semi-EV มีสมบัติอยู่ระหว่างยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแบบดั้งเดิม และแบบประสิทธิภาพ (พงษ์ธร, 2550; Chan *et al.*, 1974; Hofmann, 1988; Ciesielski, 1999)

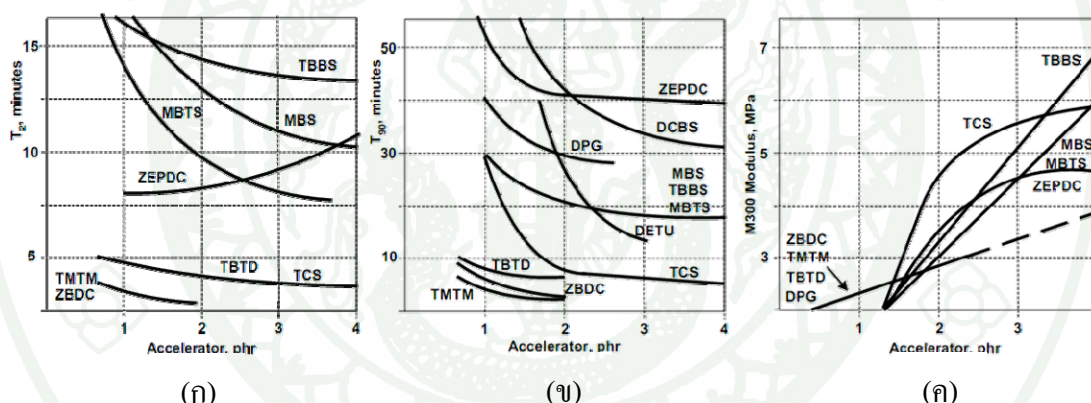
กำมะถันที่ใช้ในยางต้องมีอนุภาคขนาดเล็ก เพื่อให้การกระจายตัว (Dispersion) ในยางได้ดีขึ้น ส่งผลให้ยางเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้อย่างทั่วถึง โดยทั่วไปแล้วการเติมกำมะถันลงไปในช่วงต้องเติมในขั้นตอนสุดท้ายระหว่างการบดผสม (Mixing) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการคงรูปก่อนกำหนด (Scorch) หรือเกิดยางตาย (Premature crosslink) การใช้กำมะถันมีข้อดีกว่าระบบอื่น คือ มีราคาถูก และสามารถใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาได้หลายชนิด อย่างไรก็ตามการใช้กำมะถันในระบบการคงรูป มีข้อจำกัดด้านการใช้งานซึ่งใช้ได้เฉพาะกับยางที่มีโครงสร้างไม่อิมมัลชัน นอกจากนี้ยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วอาจมีสมบัติความต้านทานต่อความร้อนที่ด้อยกว่าการคงรูปด้วยสารทำให้เกิดการคงรูปประเภทเพอร์ออกไซด์

2.1.2 ระบบการคงรูปโดยใช้เพอร์ออกไซด์ เป็นระบบการคงรูปที่เหมาะสมสำหรับยางที่มีความอิมมัลชันหรือไม่มีพันธะคู่ภายในสายโซ่โมเลกุล เช่น ยางเอทิลีนพรอพิลีนไดอีน (Ethylene Propylene Monomer, EPM) ยางยูรีเทน (Polyurethane, AU) และยางเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (Ethylene Vinyl Acetate, EVA) เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและความร้อนสูง เนื่องจากพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้น เป็นพันธะระหว่างคาร์บอนและคาร์บอน ซึ่งมีความแข็งแรงของพันธะที่สูงกว่าพันธะระหว่างคาร์บอนและกำมะถัน

2.1.3 ระบบการคงรูปโดยใช้สารที่แตกตัวให้กำมะถัน เป็นระบบการคงรูปโดยใช้สารซึ่งสามารถสลายตัวให้กำมะถันที่อุณหภูมิการขึ้นรูป เช่น เตตระเมทิลไทอูรัมไดซัลไฟด์ (Tertramethyl thiuram disulfide, TMTD) ไดไทโอไดมอร์โฟลีน (Dithio dimorpholine, DTDM) และไดเพนตะเมทิลีนไทอูรัมเตตระซัลไฟด์ (Dipentamethylene thiuram tetrasulphide, DPTT)

2.2 สารเร่งปฏิกิริยาในการคงรูป (Accelerators)

การใช้สารทำให้เกิดการคงรูปเพียงอย่างเดียว ต้องใช้เวลาในการคงรูปที่ยาวนานมาก ดังนั้นจึงมีการใช้สารเคมีเพื่อช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง โดยเรียกสารดังกล่าวว่าสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป ทั้งนี้ชนิดและปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาที่ผสมกับยาง ให้ลักษณะการคงรูป เช่น เวลาเริ่มเกิดการคงรูป (Scorch times) เวลาการคงรูป (Cure times) ซึ่งมีผลให้สมบัติเชิงกลที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 3(ก) 3(ข) และ 3(ค) ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อแบ่งสารเร่งปฏิกิริยาในการคงรูปตามความเร็วของการเกิดปฏิกิริยา สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ ชนิดช้า (Slow accelerator) ได้แก่ กัวดิโนน (Guanidines) ชนิดปานกลาง (Medium fast accelerator) ได้แก่ ไธอาโซล (Thiazoles) ซัลฟีนามายด์ (Sulphenamides) ชนิดเร็ว ได้แก่ ไธยูเรม (Thiurams) ไดไธโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamates) และชนิดเร็วมาก ได้แก่ แซนทาต (Xanthates)



ภาพที่ 3 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อสมบัติของยาง (ก) เวลาเริ่มคงรูป (ข) เวลาในการคงรูป (ค) โมดูลัสที่ 300%

ที่มา: Hewitt (2007)

2.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators)

สารกระตุ้น คือสารที่เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น สารกระตุ้นอาจเป็นสารอินทรีย์ (Organic) หรือสารอนินทรีย์ (Inorganic) โดยสารอนินทรีย์ที่สำคัญ และนิยมใช้ คือซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) เลดออกไซด์ (Lead

oxide, PbO) หรือแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) ขณะที่สารกระตุ้นประเภท สารอินทรีย์ที่สำคัญ คือกรดไขมัน (Fatty acid) เช่น กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดปาล์มมิก (Palmitic acid) และเกลืออะมีน (Amine salt) เป็นต้น

2.4 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติมคือสารที่ผสมในยางเพื่อวัตถุประสงค์ด้านการเพิ่มสมบัติเชิงกลของยาง หรือลดต้นทุนในการผลิต การพัฒนาด้านสารตัวเติมสำหรับยางเนื่องมาจากการขยายตัวของ อุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งมีล้อยางเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการผลิตจำนวนมาก โดยสมบัติเด่นที่เป็นที่ ต้องการขณะนั้นได้แก่ การต้านทานต่อการฉีกขาด การต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ซึ่งเป็น สาเหตุหลักที่ทำให้ยางเกิดความเสียหายในขณะการใช้งาน จึงได้มีการทดลองใช้เขม่าดำ (Carbon black) ที่ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของปิโตรเลียม ซึ่งสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับยางได้ (Ciesielski, 1999) จากประสิทธิภาพในการเสริมแรงและราคาที่เหมาะสมในระดับอุตสาหกรรม จึง ทำให้มีการใช้เขม่าดำในผลิตภัณฑ์ยางหลายกลุ่มซึ่งไม่ต้องการสี เช่น ผลิตภัณฑ์กลุ่มยางล้อและ ท่อยาง ส่วนในกรณีผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการสี สดงาม ได้มีการใช้ซิลิกา (Silica) เพื่อเสริมแรง อย่างไรก็ตามในช่วงแรกของการใช้ซิลิกายังคงพบปัญหาในเรื่องของการบดผสมเข้ากับยาง จนมี การพัฒนากระบวนการบดผสมและใช้สารปรับปรุงสภาพพื้นผิว (Surface treatment) รวมไปถึงการใช้ สารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) จึงทำให้มีการใช้ซิลิกามากขึ้น โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ยาง ล้อรถบรรทุกหรือยางในกลุ่มที่ต้องการลดแรงเสียดทาน (Rolling resistance) ระหว่างยางกับพื้น ถนน เนื่องจากสมบัติการกระดอนของยางผสมซิลิกาดีกว่าผสมเขม่าดำ นอกจากนี้ยังมีสารตัวเติมที่ ผสมในยางโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) แคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate, CaSiO_3) และไชน่าเคลย์ (China clay) เป็น ต้น

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่มีการใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม โดยเขม่าดำ ได้มาจากการเผาไหม้ของปิโตรเลียมที่ไม่สมบูรณ์ มีขนาดอนุภาคประมาณ 10-500 นาโนเมตร รวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่าแอกกรีเกต (Aggregate) ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการทำงาน จึงได้มี การกำหนดเกรดของเขม่าดำ โดยแบ่งตามขนาดของอนุภาคและความเร็วในการคงรูป เช่น เขม่าดำ เกรด N330 ตัวอักษรแรกหมายถึงความเร็วในการคงรูปของยางเมื่อบดผสม เช่น อักษร N แทน ความเร็วในการคงรูประดับปกติ (Normal curing) S แทนความเร็วในการคงรูปที่ช้าลงเมื่อบดผสม

(Slow curing) ตัวเลขตำแหน่งแรกหมายถึงขนาดของ อนุภาคซึ่งแบ่งเป็น 10 ระดับตั้งแต่ 0 จนถึง 9 ในขณะที่ตัวอักษรสองตัวท้ายไม่มีการระบุความหมายที่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิต เช่น ความสามารถในการบดผสมเข้ากับยาง หรือขนาดของโครงสร้างที่เป็นกลุ่มก้อน ทั้งนี้เขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคเล็กพบว่าให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงที่ดีกว่า รวมไปถึงมีเวลาในการคงรูปเร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามการใช้เขม่าดำที่มีอนุภาคเล็กส่งผลให้การบดผสมเป็นไปได้ยากขึ้น รวมถึงมีความร้อนที่เกิดขึ้นในการบดผสมสูงกว่า นอกจากสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้นเมื่อบดผสมเข้ากับยางแล้ว เขม่าดำยังเพิ่มสมบัติการต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยางธรรมชาติและยางไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีส่วนช่วยอยู่ในสายโซ่โมเลกุล ทั้งนี้การบดผสมเขม่าดำเข้ากับยางทำให้ความหนืดของยางขณะบดผสมเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids) เพื่อช่วยให้เขม่าดำกระจายตัวในเนื้อยางได้ดีขึ้น

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีสัน โดยแรกเริ่มมีการใช้ซิลิกาในอุตสาหกรรมผลิตพื้นรองเท้าราคาถูกที่ต้องการความแข็งแรง จากนั้นจึงได้มีการพัฒนาเพื่อใช้กับชิ้นส่วนอุตสาหกรรม เนื่องจากสมบัติความต้านทานต่อการขีดและความร้อนที่ดี รวมถึงการเกิดร้อนสะสมในขณะใช้งาน (Heat build up) ที่ต่ำกว่าเขม่าดำ นอกจากนี้ยังมีการใช้ซิลิกาพร้อมกับเขม่าดำ ในการผลิตหน้ายางล้อรถยนต์เพื่อเพิ่มสมบัติการกระดอน และลดแรงเสียดทานหรือแรงต้านทานการหมุนของล้อยางที่เกิดขึ้น (Rattanasom *et al.*, 2005) ทำให้ช่วยประหยัดพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน อย่างไรก็ตามการบดผสมซิลิกาเข้ากับยางจำเป็นต้องใช้เวลาและพลังงานในการบดผสมที่นานมาก เพื่อให้ซิลิกากระจายตัวภายในเนื้อยางอย่างทั่วถึง เนื่องจากการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) ของซิลิกา นอกจากนี้จากการที่อนุภาคของซิลิกามีความพรุนสูงจึงสามารถดูดซับสารเคมีที่ผสมลงในยางในระหว่างการบดผสม ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการคงรูปของยาง ดังนั้นในช่วงของการบดผสมซิลิกาในยาง จึงจำเป็นต้องใช้สารเคมี ซึ่งได้แก่ ไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG) หรือ โพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG)

แคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมซิลิเกต เป็นสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเขม่าดำและซิลิกา ดังนั้นประสิทธิภาพในการเสริมแรงจึงต่ำกว่ามากเมื่อเทียบกับเขม่าดำและซิลิกา จึงจัดอยู่ในกลุ่มสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง (Non reinforcing filler) นิยมใช้เพื่อเพิ่มเนื้อยางหรือลดต้นทุนในกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามนอกจากประโยชน์ด้านลดต้นทุนแล้ว การผสมแคลเซียม

คาร์บอนยังทำให้เวลาในการคงรูปของยางลดลง เนื่องจากสมบัติความเป็นด่างซึ่งสามารถช่วยกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาการคงรูป (พงษ์ธร, 2550)

ไชนาเคลย์ (China clay) หรือคาโอลิน (Kaolin) เป็นสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่น้อยกว่า 2 ไมครอน เมื่อผสมลงในยาง ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการขาดของยางเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ไชนาเคลย์ชนิดหยาบซึ่งมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า 2 ไมครอน นิยมใช้เป็นสารตัวเติมชนิดลดต้นทุน

ในปัจจุบันนอกจากสารตัวเติมดังกล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีการใช้สารตัวเติมประเภทอื่นๆ เช่น การผสมเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีคุณสมบัติประมาณ 40 เปอร์เซนต์ ทำให้มีสมบัติเสริมแรง เมื่อมีการปรับปรุงสภาพก่อนการบดผสม (Kantala *et al.*, 2008) หรือเส้นใยจากธรรมชาติ ที่เหลือจากการทำเกษตรกรรม เช่น แกลบ เส้นใยมะพร้าว เส้นใยสับปะรด และเส้นใยฝ้าย เป็นต้น (Ismail *et al.*, 1996; Ismail *et al.*, 1999; Ismail *et al.*, 2002) ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมประเภทเพิ่มเนื้อได้ สารตัวเติมในกลุ่มสุดท้าย ได้แก่ สารตัวเติมที่มีขนาดเล็กมากซึ่งอยู่ในระดับนาโนเมตร (Nano-particles) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สารตัวเติมประเภทนาโนที่นิยมนำมาใช้เสริมแรงให้กับยาง ได้แก่ เส้นใยนาโนคาร์บอน (Fakhru'l-Razi *et al.*, 2006; Nah *et al.*, 2009) และนาโนเคลย์ (Qu *et al.*, 2010; Nie *et al.*, 2010) ซึ่งให้การเสริมแรงที่ใกล้เคียงกับเขม่าดำโดยใช้ปริมาณที่น้อยกว่ามาก (Nah *et al.*, 2009; Qu *et al.*, 2010)

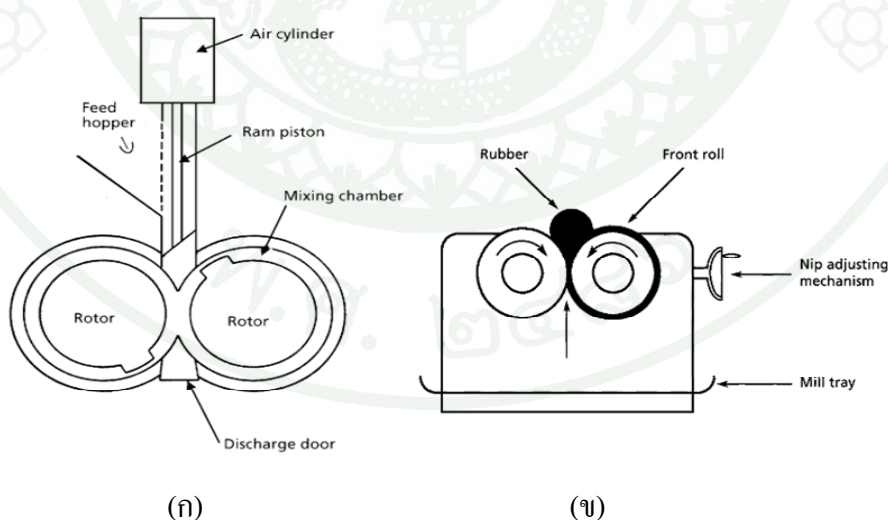
2.5 สารช่วยในการแปรรูปยาง (Plasticiser)

เนื่องจากยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ส่งผลให้ยางมีความหนืดมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อบดผสมสารตัวเติมในปริมาณสูง ทำให้ต้องใช้พลังงานมากและระยะเวลาในการบดผสมที่นาน ซึ่งทำให้เกิดความร้อนสะสมและอาจทำให้ยางเกิดการสุกตัวในขณะบดผสม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารช่วยในการแปรรูป (Plasticiser) ทั้งนี้สารดังกล่าวมีชื่อเรียกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณที่บดผสม เช่น Processing aid คือการใช้สารช่วยแปรรูปในปริมาณไม่เกิน 5 phr เพื่อให้ยางนิ่มลงในกระบวนการบดผสม ในขณะที่ Softener คือ สารที่ช่วยให้ยางที่นิ่มลงทั้งในขณะบดผสม และหลังผ่านการคงรูป โดยใช้ปริมาณ 5-15 phr นอกจากนี้สารช่วยในการแปรรูปยังสามารถใช้ในการลดต้นทุนได้เมื่อมีการบดผสมในปริมาณที่มากกว่า 15 phr ซึ่งเรียกว่า Extender

2.6 ทฤษฎีการบดผสมยาง

การบดยางเป็นกระบวนการผสมสารเคมีเข้ากับยาง สำหรับยางธรรมชาติอาจต้องมีการบดยางให้ نرم เพื่อให้สารเคมีสามารถกระจายตัวภายในเนื้อยางได้ทั่วถึง ในขณะที่ยางสังเคราะห์อาจไม่ต้องมีขั้นตอนดังกล่าว เนื่องจากการสังเคราะห์สามารถควบคุมการกระจายตัวของน้ำหนักรubber ได้ โดยขั้นตอนการบดผสมสารเคมีต่างๆ ในยางนั้นต้องจัดลำดับการผสมอย่างถูกต้อง เช่น สารเข้ากับยางได้ยาก ต้องเติมเป็นลำดับแรก ในขณะที่สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปควรเติมเป็นลำดับหลัง เพื่อป้องกันยางคงรูปก่อนเวลา ทั้งนี้การบดผสมยางเข้ากับสารตัวเติมในปริมาณมาก อาจใช้สารช่วยในกระบวนการผลิตเพื่อลดความหนืดของยาง เพื่อให้สารตัวเติมสามารถกระจายตัวภายในเนื้อยางได้ดีขึ้น ยางที่บดผสมสารเคมีแล้วควรเก็บไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ (พงษ์ธร, 2550)

เครื่องมือที่ใช้ในการบดผสมยาง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องบดผสมระบบปิด (Internal mixer) ดังแสดงในภาพที่ 4(ก) ซึ่งเป็นเครื่องที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถบดได้ในปริมาณมาก และควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการบดผสมได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ดังแสดงในภาพที่ 4(ข) ซึ่งนิยมใช้ในอุตสาหกรรมขนาดกลางและ



ภาพที่ 4 เครื่องบดผสมยาง (ก) ระบบปิด (ข) ระบบเปิด

ที่มา: Funt (2009)

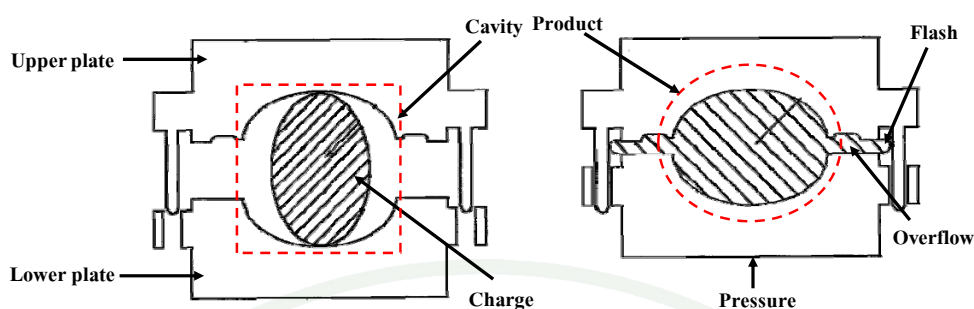
ขนาดเล็กเนื่องจากมีราคาถูก แต่การบดผสมกับเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง ยังคงต้องอาศัยทักษะและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน รวมถึงการควบคุมอุณหภูมิและการฟุ้งกระจายของสารเคมีในระหว่างการบดผสม

3 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยใช้แม่พิมพ์ (Rubber molding process)

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยใช้แม่พิมพ์ อาศัยการให้ความร้อนและแรงอัดจากเครื่องจักรให้ยางสามารถไหลเข้าแม่พิมพ์เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีรูปร่างตามต้องการ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการขึ้นรูปยางโดยใช้แม่พิมพ์ สามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะตามการขึ้นรูป คือ

3.1 กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding)

กระบวนการอัดขึ้นรูปยาง เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก เนื่องจากต้นทุนด้านเครื่องจักรและแม่พิมพ์ที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่น แม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูป ประกอบด้วยแม่พิมพ์ 2 ส่วนหลัก คือ แม่พิมพ์ส่วนบน (Upper plate) และแม่พิมพ์ส่วนล่าง (Lower plate) ดังแสดงในภาพที่ 5 ขนาดของแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับรูปร่างชิ้นงานและจำนวนเบ้าแม่พิมพ์ (Cavity) ขั้นตอนการขึ้นรูปเริ่มจากใส่ยางคอมพาวนด์ลงไปเบ้าพิมพ์ จากนั้นทำการปิดแม่พิมพ์และอัดยางคอมพาวนด์ให้ไหลจนเต็มเบ้าพิมพ์ โดยมีชุดให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ ได้แก่ แท่งความร้อน (Heater rod) เพื่อให้ยางเกิดปฏิกิริยาการขึ้นรูป นอกจากนี้ในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน สามารถใช้เทคนิคอัดและคลาย (Bumping) เพื่อไล่อากาศภายในแม่พิมพ์ให้ยางสามารถไหลเข้าแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น โดยทั่วไปแล้วควรเตรียมยางคอมพาวนด์ให้มีปริมาณมากกว่าปริมาณเบ้าแม่พิมพ์ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ยางไหลได้เต็มแบบและมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ทั้งนี้ยางส่วนที่ไหลเกินจากเบ้าแม่พิมพ์ตามร่องประกบเรียกว่าครีบ (Flash) ซึ่งต้องมีการตัดแต่งชิ้นงานหลังจากออกจากแม่พิมพ์

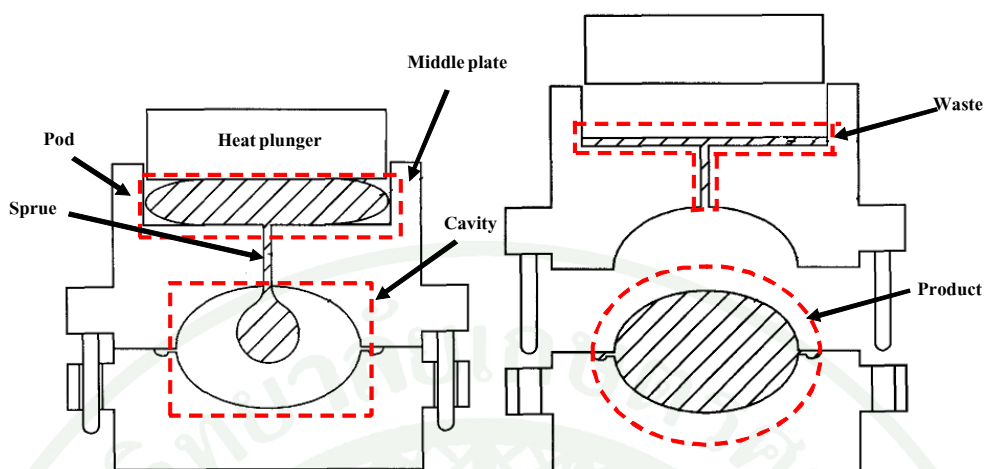


ภาพที่ 5 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป

ที่มา: Ciesielski (1999)

3.2 กระบวนการอัดส่งขึ้นรูป (Transfer molding)

กระบวนการอัดส่งขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากกระบวนการอัดขึ้นรูป ส่วนประกอบของแม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ แม่พิมพ์ส่วนบนที่มีลักษณะคล้ายแท่งกด (Plunger) แม่พิมพ์ส่วนกลาง (Middle plate) ที่มีช่องว่าง (Pot) สำหรับใส่ยางคอมพาวนด์ และเบ้าแม่พิมพ์ส่วนล่างที่เป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในภาพที่ 6 หลักการของกระบวนการอัดส่ง คือ การใช้แม่พิมพ์แผ่นบนอัดให้ยางคอมพาวนด์ไหลผ่านรูฉีด (Sprue) เข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างตามต้องการ ข้อเด่นของกระบวนการขึ้นรูปแบบนี้ นอกเหนือจากสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนแล้ว ยังใช้เวลาในกระบวนการคงรูปที่น้อยกว่า เมื่อเทียบกับกระบวนการอัดขึ้นรูปเนื่องจากความร้อนเฉือน (Shear heating) ที่เกิดขึ้น ขณะที่ยางคอมพาวนด์ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ ส่งผลให้ยางคอมพาวนด์มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และทำให้ลดระยะเวลาในการคงรูปของยางภายในเบ้าพิมพ์ อย่างไรก็ตามนอกเหนือจากต้นทุนการผลิตแม่พิมพ์ที่สูงกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูปแล้ว กระบวนการอัดส่งยังมีข้อเสียที่เกิดจากก้านรูฉีด รวมถึงส่วนของแม่พิมพ์ด้านบนและทางวิ่ง (Runner) ที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ส่วนล่างในกรณีขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบหลายเบ้าพิมพ์ (Multiple cavities)



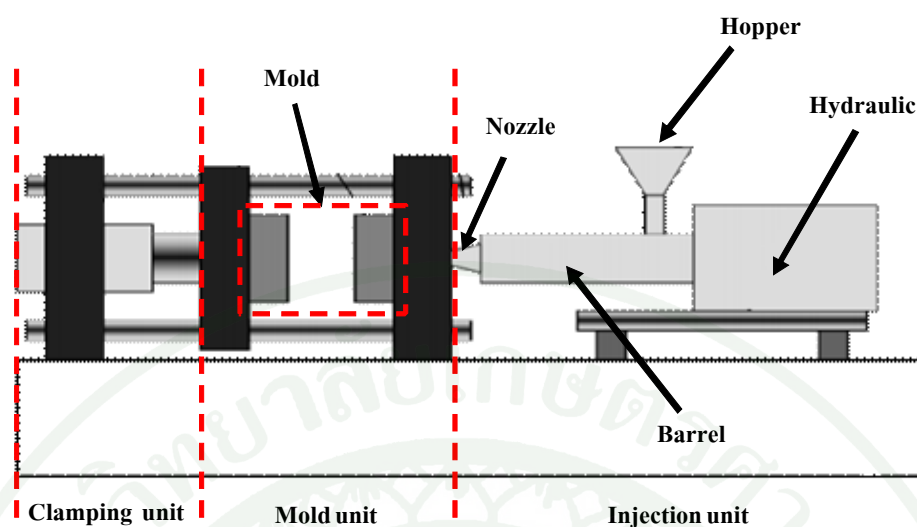
ภาพที่ 6 แม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูป

ที่มา: Ciesielski (1999)

3.3 กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

กระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เนื่องจากให้อัตราการผลิตที่สูงและสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อน อย่างไรก็ตาม กระบวนการฉีดขึ้นรูปมีต้นทุนด้านเครื่องจักรและแม่พิมพ์ที่ใช้สูงกว่ากระบวนการอื่น รวมไปถึงมีของเสียที่เกิดจาก ก้านรูฉีด ทางวิ่ง และทางเข้า โดยส่วนประกอบของเครื่องฉีดขึ้นรูป แสดงดังภาพที่ 7 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ชุดฉีด (Injection unit) ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (Clamping unit) และชุดแม่พิมพ์ฉีด (Injection mold unit) ตามลำดับ

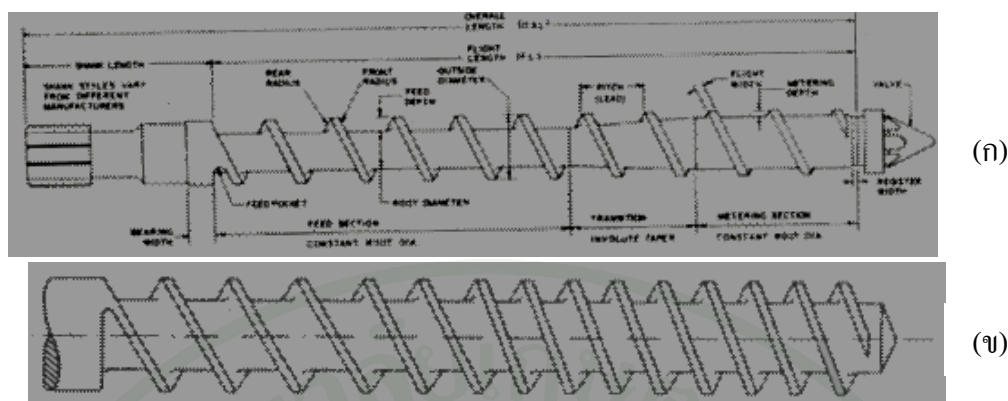
3.3.1 ชุดฉีด (Injection unit) เป็นส่วนประกอบสำคัญในการเตรียมเนื้อยางเพื่อใช้ในการฉีด รวมไปถึงให้แรงดันฉีด (Injection pressure) และแรงดันคงค้าง (Holding pressure) ในการฉีดขึ้นรูป โดยชุดฉีดมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ห้องหลอมเหลว (Barrel) สกรู (Screw) และกรวยเติม (Hopper)



ภาพที่ 7 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดขึ้นรูป

สกรูที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลักตลอดความยาวของสกรู ซึ่งได้แก่ ช่วงการลำเลียง (Feed zone) ดังแสดงในภาพที่ 8(ก) ซึ่งมีความลึกของร่องเกลียว (Channel depth) มากที่สุด เพื่อลำเลียงเม็ดพลาสติก จากกรวยเดิมเข้าสู่ห้องหลอมเหลว และในช่วงการอัด (Compression /Transition zone) ที่มีความลึกของร่องเกลียวลดลง เพื่อให้เกิดการหลอมละลายจากความร้อนที่เกิดขึ้น ในช่วงสุดท้ายเป็นช่วงที่มีความลึกของร่องเกลียวน้อยที่สุด ซึ่งเรียกว่าช่วงการเพิ่มความดัน (Metering /Pumping zone) และความหนาแน่นให้กับพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยส่วนนี้มีวาล์วกันไหลย้อนกลับ (Non-return valve) ที่บริเวณหัวสกรู เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของพลาสติกหลอมเหลวในจังหวะการฉีดขึ้นรูป โดยทั่วไปแล้วสกรูที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกมีอัตราส่วนการอัดประมาณ 4 ต่อ 1 และมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 ถึง 25 ต่อ 1 (Verbraak and Meijer, 1989)

สกรูที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปยาง มีความแตกต่างจากสกรูที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก กล่าวคือ สกรูที่ใช้ในการฉีดยางมีความลึกของร่องเกลียวเท่ากันตลอดความยาวของสกรู ดังแสดงในภาพที่ 8(ข) หรือมีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 1 มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 ถึง 16 ต่อ 1 ทั้งนี้การออกแบบดังกล่าวเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจทำให้ยางเกิดการสุกตัว

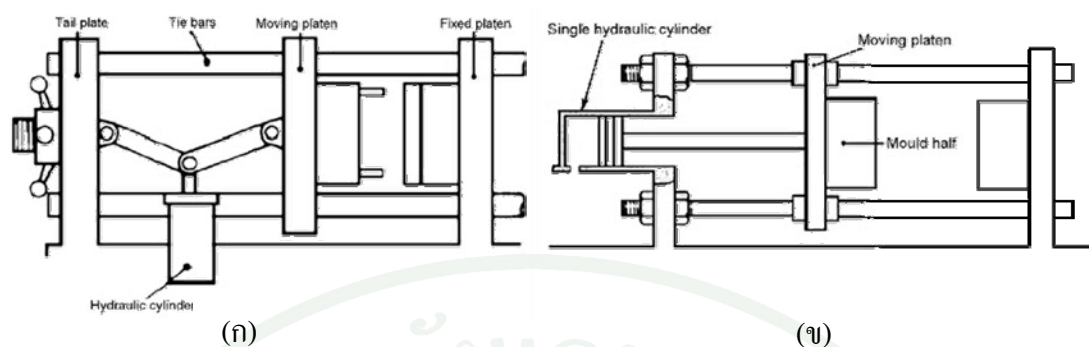


ภาพที่ 8 สกรูในเครื่องฉีดขึ้นรูป (ก) เทอร์โมพลาสติก (ข) ยาง

ที่มา: Rauwendall (1986)

3.3.2 ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (Clamping unit) ทำหน้าที่ควบคุมการปิดหรือเปิดแม่พิมพ์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ระบบปิด-เปิดแบบข้อพับ (Toggle clamping system) และระบบปิด-เปิดแบบไฮดรอลิก (Hydraulic clamping system)

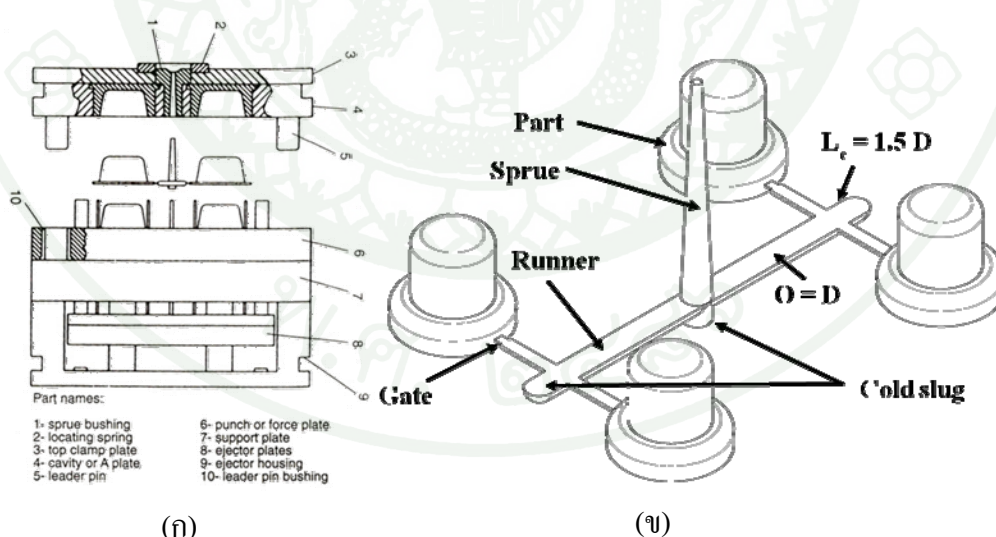
ระบบปิด-เปิดแบบข้อพับ นิยมใช้ในเครื่องฉีดขนาดเล็กและขนาดกลาง ใช้ระบบไฮดรอลิกดันหรือใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนข้อต่อรูปตัววีเพื่อดันปิดแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 9(ก) ซึ่งมีความเร็วในการปิด-เปิดแม่พิมพ์สูง และมีระบบล็อกอัตโนมัติ (Self-locking) ทำให้ประหยัดพลังงาน อย่างไรก็ตามระบบปิด-เปิดแบบข้อพับ มีข้อจำกัดในด้านความทนทานและความแม่นยำในการใช้งาน เนื่องจากเป็นระบบทางกล จึงมีการสึกหรอเมื่อผ่านการใช้งาน รวมไปถึงต้องมีความหนาของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมกับความยาวของข้อพับ เพื่อให้สามารถล็อกอัตโนมัติได้ ในขณะที่ระบบปิด-เปิดแบบไฮดรอลิก เป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมกับเครื่องฉีดขนาดกลางและขนาดใหญ่ มีข้อดีคือ สามารถควบคุมระยะและแรงในการปิด-เปิดได้แม่นยำ อย่างไรก็ตามข้อด้อยของระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบไฮดรอลิก คือ มีความเร็วในการปิด-เปิดแม่พิมพ์ที่ช้าและใช้พลังงานที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบปิด-เปิดแบบเฟลาข้อเหวี่ยง โดยมีลักษณะในการทำงานดังแสดงในภาพที่ 9(ข)



ภาพที่ 9 ระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์ (ก) แบบเฟลาข้อพับ (ข) แบบไฮดรอลิก

ที่มา: Jones (2008)

3.3.3 ชุดแม่พิมพ์ฉีด เป็นส่วนประกอบหลักของกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยภาพที่ 10(ก) แสดงแม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น ซึ่งประกอบไปด้วย รูฉีด ทางวิ่ง ทางเข้า และเบ้าแม่พิมพ์ (Cavity) โดยมีชุดให้ความร้อนในกรณีของแม่พิมพ์ยางเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาของรูป หรือระบบหล่อเย็น เพื่อควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก

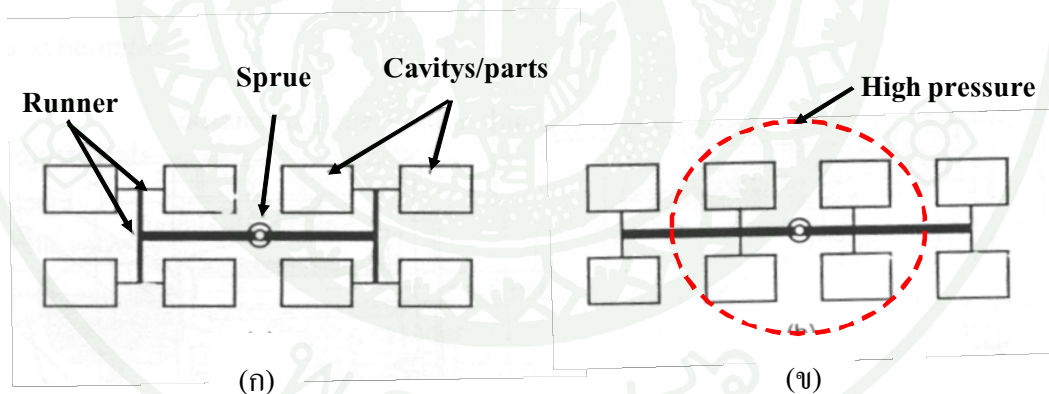


ภาพที่ 10 ชุดแม่พิมพ์ฉีด (ก) แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น (ข) ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป

รูฉีดเป็นส่วนแรกที่ยางหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลจากหัวฉีดเข้าสู่ชุดแม่พิมพ์ มีขนาดของมูอยู่ระหว่าง 3-5 องศา และมีบ่อพักเย็น (Cold slug) บริเวณด้านใต้ของรูฉีด

เพื่อทำหน้าที่กักเก็บยางหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลเข้าแม่พิมพ์ส่วนแรก ซึ่งเริ่มเย็นตัวหรือคงรูป ทั้งนี้การวางบ่อพักเย็นที่เหมาะสมควรอยู่ในตำแหน่งซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลที่ตั้งฉากกับทิศทางเดิม เช่น ด้านใต้ของรูฉีด และตำแหน่งปลายของทางวิ่งหลัก โดยมีความยาวประมาณ 1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางวิ่ง (Beaumont, 2004) ดังแสดงในภาพที่ 10(ข) เพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลวหรือยางสามารถไหลได้อย่างต่อเนื่องภายในทางวิ่ง

ทางวิ่งเป็นส่วนที่นำยางหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวจากรูฉีด ไปยังทางเข้า ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ทางวิ่งเย็น (Cold runner) ซึ่งใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุเทอร์โมพลาสติก และทางวิ่งร้อน (Hot runner) ซึ่งใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุยาง ทั้งนี้การออกแบบทางวิ่งนั้น ต้องพิจารณาถึงรูปร่างหน้าตัดของทางวิ่ง ขนาดของทางวิ่ง รวมถึงความสมมาตรของทางวิ่ง ซึ่งสามารถทำให้ยางหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถไหลเข้าทุกเบ้าพิมพ์ได้พร้อมกัน ดังแสดงในภาพที่ 11 เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ยกตัวอย่าง เช่น การฉีดไม่เต็มเบ้าแม่พิมพ์ (Short shot) ความหนาแน่นหรือความแข็งแรงของชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอในแต่ละเบ้าขึ้นงานภายหลังจากผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 รูปแบบของทางวิ่ง (ก) แบบสมมาตร (ข) แบบไม่สมมาตร

ทางเข้าเป็นส่วนประกอบของแม่พิมพ์ที่อยู่ระหว่างทางวิ่งและเบ้าแม่พิมพ์ มีลักษณะเป็นช่องขนาดบางและเล็กเพื่อให้สามารถตัดออกจากชิ้นงานได้ง่าย และทำหน้าที่เพิ่มความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากอัตราครีปเคชั่นที่เพิ่มสูงขึ้น ในกรณีของวัสดุยางทางเข้าที่เหมาะสมไม่ควรมีขนาดเล็กเกินไป เพื่อป้องกันการคงรูปของยางก่อนไหลเข้า

แม่พิมพ์ จากความร้อนที่เกิดขึ้น โดยอัตราครีดยืดเคืองที่เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ยางไม่ควรมีค่าเกิน 1000 s^{-1} (Isayev, 1991)

4. ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ยางโดยใช้แม่พิมพ์ (Defect in rubber molding)

โดยทั่วไปปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์ มีสาเหตุมาจากการออกแบบแม่พิมพ์ การเลือกใช้ปัจจัยในกระบวนการผลิต และการใช้สูตรยางที่ไม่เหมาะสม ซึ่งทั้งสามปัจจัยมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางภายหลังจากการขึ้นรูป ปัญหาที่พบ ได้แก่ การขึ้นรูปไม่เต็มเบ้าพิมพ์ การเกิดครีบ การคงรูปของผลิตภัณฑ์ที่ไม่สม่ำเสมอ (Uneven cure) และการเกิดรอยประสาน (Weldline) เป็นต้น

4.1 การขึ้นรูปไม่เต็มเบ้าแม่พิมพ์ (Short shot)

การขึ้นรูปไม่เต็มเบ้าแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 12 เกิดได้จากหลายสาเหตุ ได้แก่ การออกแบบแม่พิมพ์ที่ไม่เหมาะสม เช่น การวางตำแหน่งช่องระบายอากาศ (Venting) การวางตำแหน่งทางเข้า หรือการวางรูปแบบทางวิ่งที่ไม่สมมาตร รวมไปถึงการใช้ปัจจัยในกระบวนการขึ้นรูปที่ไม่เหมาะสม เช่น แรงดันและอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ไม่เหมาะสม เป็นต้น จากเหตุผลดังกล่าว ส่งผลให้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ไม่เต็มเบ้าแม่พิมพ์

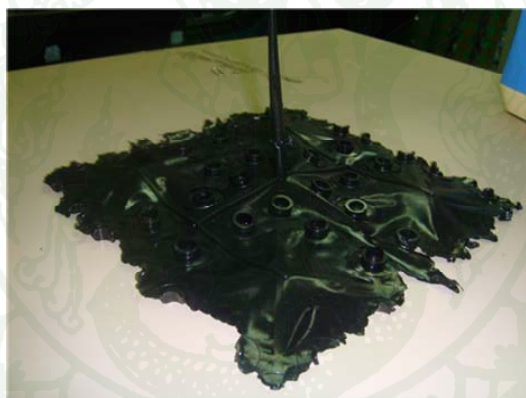


ภาพที่ 12 ชิ้นงานที่ฉีดไม่เต็มเบ้าพิมพ์

ที่มา: Beaumont (2004)

4.2 การเกิดครีป (Flash)

ครีปที่เกิดในกระบวนการขึ้นรูป มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ตามขอบของชิ้นงานหรือบริเวณเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (Parting line) ซึ่งเป็นส่วนที่ยางหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลออกจากเบ้าแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 13 ทั้งนี้เกิดจากการใช้แรงดันในการขึ้นรูปที่สูงกว่าแรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping force) รวมไปถึงการสึกหรอที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าแม่พิมพ์ เมื่อมีการใช้งานเป็นระยะเวลานาน (Beaumont, 2004; Osswald *et al.*, 2008) อย่างไรก็ตามในกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง มักพบการเกิดครีปเนื่องจากการใช้ปริมาณของยางที่มากกว่าเบ้าแม่พิมพ์ เพื่อให้ยางสามารถไหลได้เต็มแบบ การแก้ไขการเกิดครีปในกระบวนการขึ้นรูป สามารถทำได้โดยลดแรงดันที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป และเพิ่มแรงดันปิดแม่พิมพ์ รวมไปถึงตรวจสอบการสึกหรอของแม่พิมพ์ที่ใช้

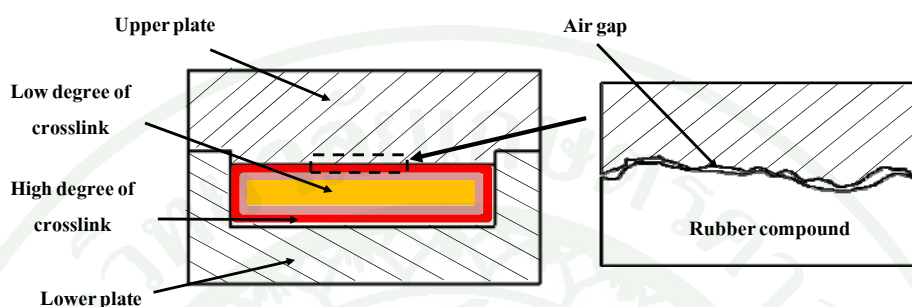


ภาพที่ 13 ครีปที่เกิดจากกระบวนการอัดขึ้นรูป

4.3 การคงรูปของผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่สม่ำเสมอ (Uneven cure)

ปัญหาการคงรูปของผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่สม่ำเสมอ เกิดขึ้นในกรณีผลิตภัณฑ์ที่มีความหนามาก ซึ่งจากสมบัติของยางที่มีความเป็นฉนวนกันความร้อน จึงทำให้ความร้อนจากชั้นผิวไม่สามารถส่งผ่านไปยังชั้นแกนกลางได้ ดังนั้นจึงมีการคงรูปเฉพาะที่ชั้นผิวของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้เมื่อยางที่ชั้นผิวเริ่มคงรูป จึงเกิดการหดตัวเป็นช่องว่างระหว่างผิวของแม่พิมพ์และเนื้อยาง ส่งผลให้การส่งผ่านความร้อนลดลงจากแม่พิมพ์ไปยังเนื้อยางลดลง (Chookeaw *et al.*, 2010c) ดังแสดงในภาพที่ 14 แนวทางการแก้ไขเบื้องต้นคือการให้ความร้อนเป็นลำดับขั้น (Step cure) หรือนำ

คอมพาวนด์มาอุ่นให้ความร้อนก่อนนำไปขึ้นรูป นอกจากนี้อาจใช้การปรับสูตรยางในแต่ละชั้นให้มีความเร็วในการคงรูปที่ต่างกัน (Hofmann, 1988) เพื่อให้ความร้อนสามารถกระจายตัวภายในเนื้อยางได้สม่ำเสมอ

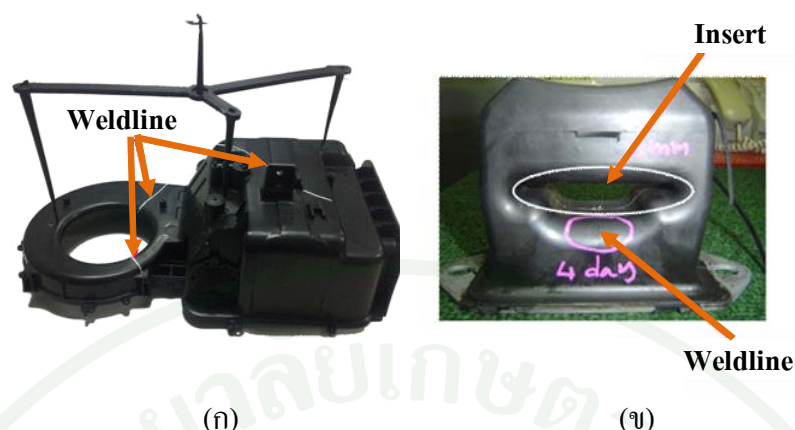


ภาพที่ 14 การคงรูปที่ไม่สม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ยางที่มีความหนา

ที่มา: Chookeaw *et al.* (2010c)

4.4 การเกิดรอยประสาน

การเกิดรอยประสานในกระบวนการขึ้นรูป เกิดจากยางหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวเกิดการแยกไหลภายในแม่พิมพ์ แล้วไหลมาบรรจบกัน ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ขึ้นงานมีขนาดใหญ่ ที่จำเป็นต้องใช้ทางเข้าหลายตำแหน่ง (Multiple gates) ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป หรือการวางยางคอมพาวนด์เริ่มต้น (Multiple Charges) หลายตำแหน่งในกระบวนการอัดขึ้นรูป เพื่อให้ยางหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถไหลเต็มเบ้าแม่พิมพ์ได้ จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้เกิดรอยประสานขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 15(ก) ทั้งนี้รอยประสานยังสามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ขึ้นงานมีความซับซ้อน ต้องใช้อินเสิร์ต (Insert) หรือสิ่งกีดขวาง (Obstacle) ภายในแม่พิมพ์ ซึ่งทำให้เกิดการแยกไหลภายในแม่พิมพ์ เกิดเป็นรอยประสานขึ้นดังแสดงในภาพที่ 15(ข) นอกจากนี้รอยประสานยังสามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ขึ้นงานมีความหนาที่แตกต่างกัน จึงทำให้ความเร็วในการไหลภายในแม่พิมพ์ที่ต่างกัน ส่งผลให้เกิดการแยกไหลขึ้น (Fellahi *et al.*, 1995)

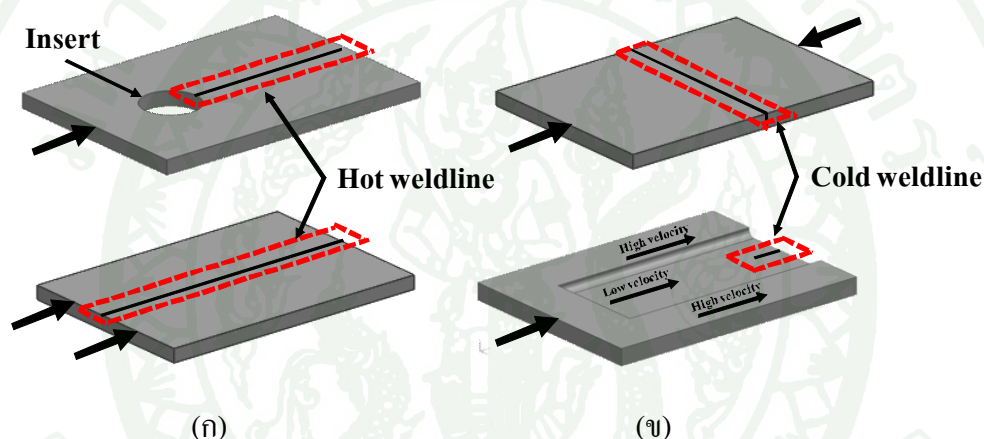


ภาพที่ 15 การเกิดรอยประสานบนผลิตภัณฑ์ในกรณี (ก) มีทางเข้าหลายตำแหน่ง
(ข) มีอินเสิร์ทภายในแม่พิมพ์

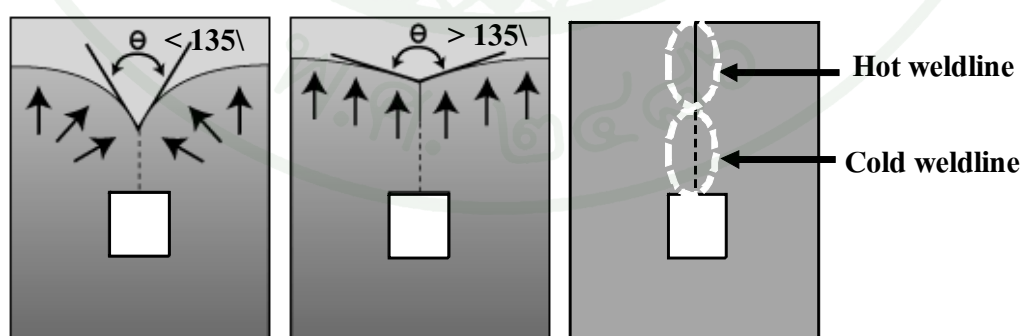
รอยประสานที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ รอยประสานร้อน (Hot weldline) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลมาบรรจบกันและมีการไหลต่อเนื่องจนเต็มเบ้าแม่พิมพ์ ตัวอย่างการเกิดรอยประสานลักษณะนี้ เช่น การมีสิ่งกีดขวางหรืออินเสิร์ทภายในแม่พิมพ์ และมีการออกแบบให้มีทางเข้าอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 16(ก) เป็นต้น ในขณะที่รอยประสานเย็น (Cold weldline) เกิดขึ้นจากการที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลมาบรรจบกันและไม่เกิดการไหลต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 16(ข) โดยทั่วไปแล้วในโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer aided engineering, CAE) ได้มีการจำแนกประเภทของรอยประสานโดยใช้มุมปะทะ (Contact angle, θ) ที่ยางหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลมาบรรจบกัน กล่าวคือ รอยประสานเย็นเกิดขึ้นเมื่อมุมปะทะของยางหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลมาบรรจบกันมีค่าไม่เกิน 135° ในขณะที่รอยประสานร้อนเกิดขึ้นในกรณีที่มุมปะทะมีค่ามากกว่า 135° ดังแสดงในภาพที่ 17 ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถเกิดรอยประสานได้ทั้งสองประเภทในการขึ้นรูป (Shoemaker, 2008)

จากงานวิจัยในอดีตพบว่าความแข็งแรงของรอยประสาน (Weldline strength) ในวัสดุเทอร์โมพลาสติก ขึ้นอยู่กับชนิดของเทอร์โมพลาสติก (Malguarnera and Manisali, 1981; Selden, 1997) และปัจจัยในกระบวนการขึ้นรูป เช่น อุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลว อุณหภูมิของแม่พิมพ์ และความดันที่ใช้ เป็นต้น (Nguyen-Chung, 2004; Liu *et al.*, 2001; Kim and Suh, 1986; Selden; 1997; Turng and Kharbas, 2003; Wu and Liang., 2005) นอกจากนี้ในกรณีของเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตพบว่าความแข็งแรงของรอยประสาน ยังขึ้นอยู่กับชนิด ปริมาณ และลักษณะการจัดเรียงตัวของสารเสริมแรง (Reinforcing filler) เช่น ปริมาณเส้นใยแก้วหรือท่อน้ำตาลที่เพิ่มมา

ขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของรอยประสานมีค่าลดลง (Morelli *et al.*, 2007; Patcharaphun *et al.*, 2006) ในกรณีของวัสดุยาง Seadan *et al.* (2002) พบว่าแรงดันในกระบวนการขึ้นรูป ความหนืดของยางคอมพาวนด์ และปริมาณเขม่าดำ ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยประสานในชิ้นงานยางธรรมชาติ และยางสไตรีนบิวตาไดอีน Chookeaw *et al.* (2010a) พบว่าความแข็งแรงของรอยประสานในชิ้นงานยางอะครีโลไนไตรล์บิวตาไดอีน ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณสารตัวเติม นอกจากนี้ Chookeaw *et al.* (2010b) พบว่าอุณหภูมิแม่พิมพ์ส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยประสานในยางธรรมชาติลดลง ในขณะที่การเพิ่มแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่ใช้ทำให้ความแข็งแรงของรอยประสานเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 16 ประเภทของรอยประสาน (ก) รอยประสานร้อน (ข) รอยประสานเย็น



ภาพที่ 17 การแบ่งประเภทของรอยประสานโดยใช้มุมปะทะ

ที่มา: Shoemaker (2008)

ในกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดรอยประสานได้ นอกเหนือจากการปรับเปลี่ยนปัจจัยในกระบวนการผลิตให้เหมาะสมแล้ว ยังสามารถใช้เทคนิคพิเศษในการขึ้นรูป ยกตัวอย่างเช่น การใช้เทคนิค Sequential Valve Gate (Kühnert *et al.*, 2005) การใช้เทคนิค Shear Control Orientation Injection Molding (SCORIM) (Pittman *et al.*, 1996; Reis *et al.*, 1998) และการใช้เทคนิค Push-Pull Injection เป็นต้น (Ludwig *et al.*, 1995; Patcharaphun, 2006)

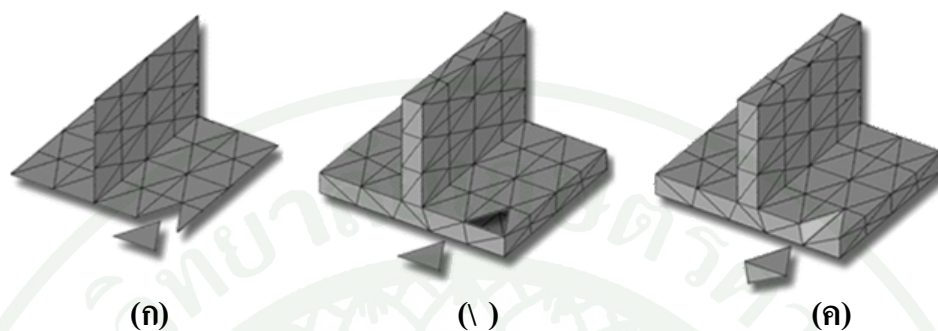
5. การวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมการผลิตมีการแข่งขันสูงทั้งในด้านของคุณภาพ ราคา และความเร็วของการตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค ทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในกระบวนการผลิต (Computer integrated manufacturing, CIM) เริ่มตั้งแต่การสร้างแบบจำลอง 3 มิติของผลิตภัณฑ์ (Computer aided design, CAD) ซึ่งสามารถช่วยให้เห็นการประกอบ (Assembly) และรูปร่างของผลิตภัณฑ์ได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังมีการนำโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer aided engineering, CAE) ซึ่งมีบทบาทอย่างมาก เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้กับงานทางวิศวกรรมได้หลากหลาย เช่น การทำนายความเสียหายเมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานจริง การทำนายอายุของผลิตภัณฑ์ และการจำลองกระบวนการขึ้นรูป เช่น การวิเคราะห์การไหลของพอลิเมอร์ภายในแม่พิมพ์ การจำลองการเป่าขึ้นรูป และการจำลองกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป เป็นต้น

5.1 การวิเคราะห์การไหลของพอลิเมอร์ภายในแม่พิมพ์

การวิเคราะห์การไหลของพอลิเมอร์ภายในแม่พิมพ์ ใช้หลักการระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนามาเป็นโปรแกรมสำเร็จรูป เช่น Moldflow Cadmould Moldex และ 3DSigma เป็นต้น แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์การไหลมีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่าย (Mesh) ซึ่งเกิดจากการแบ่งแบบจำลองของชิ้นงานออกเป็นส่วนย่อยๆ หรือ เอลิเมนต์ (Element) โดยแต่ละเอลิเมนต์เชื่อมต่อกันที่โหนด (Node) ทั้งนี้โครงสร้างตาข่ายที่ใช้ในการจำลองการไหลของพอลิเมอร์ภายในแม่พิมพ์ ได้แก่ โครงสร้างตาข่ายแบบ 2 มิติ (Midplane) ซึ่งแบ่งเอลิเมนต์ที่จุดกึ่งกลางของความหนาชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 18(ก) โครงสร้างตาข่ายแบบ 2.5 มิติ (Dual domain) ซึ่งแบ่งเอลิเมนต์ที่ผิวของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 18(ข) และโครงสร้างตาข่ายแบบ 3 มิติ (Solid) ซึ่งแบ่งเอลิเมนต์ตลอดความหนาของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 18(ค) โดย

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม Cadmould เวอร์ชัน 2.0 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบ 2.5 มิติ และมีฐานข้อมูลของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์



ภาพที่ 18 โครงสร้างตาข่าย (ก) แบบ 2 มิติ (ข) แบบ 2.5 มิติ (ค) แบบ 3 มิติ

ที่มา: Shoemaker (2008)

5.2 สมมุติฐานในการวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์

สมมุติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ของโครงสร้างตาข่ายแบบ 2 และ 2.5 มิติ ได้แก่ การไหลเป็นแบบลามินาร์ (Laminar flow) และมีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) กล่าวคือ เป็นของไหลที่มีค่าความหนืด (Viscosity) คงที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Time independent) และอัตราเครียดเฉือน (Shear rate, $\dot{\gamma}$) นอกจากนี้สมมุติฐานทางความร้อนกำหนดให้มีการนำความร้อน (Heat conduction) เฉพาะทิศทางตามความหนา (Thickness direction) ในขณะที่สมมุติฐานในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ ได้แก่ พิจารณาการถ่ายเทความร้อนในทุกทิศทาง รวมถึงมีการคำนวณความดัน ความเร็วและอุณหภูมิที่แต่ละโหนด โดยใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation)

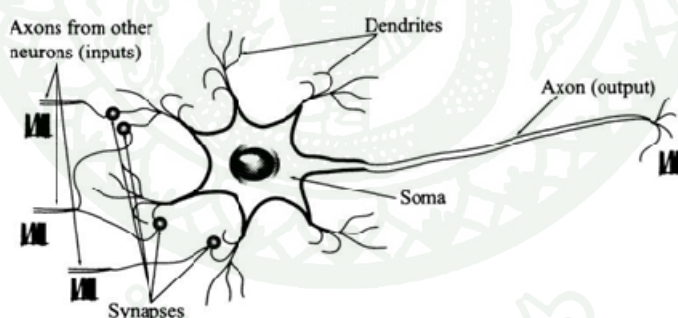
5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตพบว่า ได้มีการนำโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมมาใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ หลังผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป ยกตัวอย่างเช่น การหดตัวของชิ้นงาน (Shrinkage) การบิดเบี้ยว (Warpage) และเวลาในการเย็นตัว

ของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ฉีด (Akay and Ozden, 1996; Yeung and Lau, 1997; Ching *et al.*, 2009) รวมถึงใช้ในการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วภายในชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป นอกจากนี้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมยังเข้าไปมีบทบาทอย่างมากในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด เพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งการเกิดรอยประสานบนชิ้นงาน และการเกิดอากาศค้าง (Air trap) ภายในแม่พิมพ์ เป็นต้น (Kima *et al.*, 2003; Beaumont, 2004; Shoemaker, 2008; Yung *et al.*, 2008)

6. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

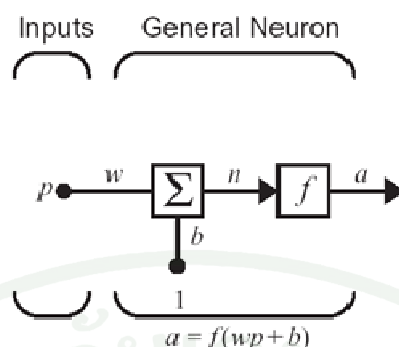
เครือข่ายประสาทเทียมเป็นการจำลองการเรียนรู้และทำงานในสมองมนุษย์ ซึ่งมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก จึงมีโครงสร้างของแบบจำลองหลากหลายรูปแบบ โดยหลักการทำงานของสมองเริ่มจากการรับข้อมูลจากภายนอก (Input) โดยมีตัวรับข้อมูลประมวลผลหรือนิวรอน (Neuron) และมีค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) หรือค่าความสำคัญของข้อมูล (Synapses strength) ในแต่ละตัวแปรที่แตกต่างกัน เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปยังตัวเซลล์ (Soma) จากนั้นจึงส่งผลลัพธ์ที่ได้ต่อไปยังเครือข่ายอื่นๆ ผ่านทาง Axon ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 แบบจำลองการทำงานของเครือข่ายประสาท

ที่มา: Hagan *et al.* (1995)

จากแบบจำลองของเครือข่ายประสาทเทียมในภาพที่ 19 เมื่อนำมาแสดงโดยใช้สัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายดังแสดงในภาพที่ 20 ซึ่งเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 1



ภาพที่ 20 โครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียม

ที่มา: Hagan *et al.* (1995)

$$a = f(wp + b) \quad (1)$$

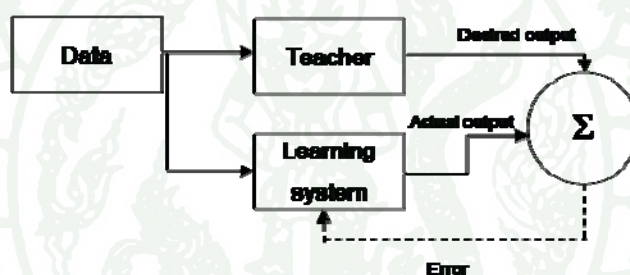
โดยที่	a	=	ตัวแปรตาม
	p	=	ตัวแปรต้น
	f	=	ฟังก์ชันส่งผ่าน (Transfer function, f)
	W	=	น้ำหนักของตัวแปร
	b	=	ค่าไบแอส

6.1 ประเภทของเครือข่ายประสาทเทียม

การแบ่งหรือจำแนกเครือข่ายประสาทเทียมสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ การแบ่งตามโครงสร้างของเครือข่าย และการแบ่งตามลักษณะของการเรียนรู้ ประเภทของเครือข่ายประสาทเทียมเมื่อแบ่งตามโครงสร้าง สามารถแบ่งแยกย่อยได้อีก 2 โครงสร้างใหญ่ ได้แก่ Feed forward networks และ Recurrent networks ซึ่งโครงสร้างทั้งสองมีข้อแตกต่างในด้านการส่งผ่านข้อมูลในแต่ละชั้นที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ในโครงสร้างแบบ Feed forward มีการส่งผ่านข้อมูลในทิศทางเดียวกันจากอีกชั้นหนึ่งสู่อีกชั้นหนึ่ง โดยไม่มีการข้ามชั้นหรือส่งข้อมูลกลับ เครือข่ายโครงสร้างนี้ได้แก่ Multilayer perception Generalized feed forward และ Modular feed forward เป็นต้น ในขณะที่โครงสร้างแบบ Recurrent การส่งผ่านข้อมูลสามารถส่งไปได้อย่างอิสระทั้งในลำดับชั้นถัดไป ชั้นก่อนหน้า หรือชั้นเดียวกัน ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้ได้แก่ Jordan and Elman เป็นต้น โดยส่วนใหญ่เครือข่ายประสาทเทียมแบบ Multilayer perception เหมาะสมกับงานทั่วไป ที่มีความสัมพันธ์ของตัว

แปรไม่ซับซ้อน ในขณะที่แบบ Recurrent เหมาะสำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนมากกว่า อย่างไรก็ตาม ตามพบว่าแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบ Recurrent นำมาประยุกต์ใช้ได้ยากเนื่องจาก ความซับซ้อนของแบบจำลองที่ต้องอาศัยเวลาในการเรียนรู้ที่นานและใช้คอมพิวเตอร์ที่มี ประสิทธิภาพสูงในการสร้างเครือข่ายประสาทเทียมที่มีความแม่นยำในการคำนวณ

เครือข่ายประสาทเทียมเมื่อแบ่งตามลักษณะของการเรียนรู้สามารถแบ่งได้อีก 3 แบบ ได้แก่ การเรียนแบบมีการสอน (Supervised learning) การเรียนรู้ลักษณะนี้ มีข้อมูล 2 ชุด คือ ตัว แปรต้น และตัวแปรตามหรือเป้าหมาย โดยอาศัยการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) จากผลลัพธ์ที่ได้ จากเครือข่ายเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่มีอยู่แล้ว จนผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ตั้งไว้ ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 เครือข่ายประสาทเทียมแบบมีการสอน

การเรียนรู้แบบไม่มีการสอน (Unsupervised learning) การเรียนรู้ลักษณะนี้มีข้อมูล เพียงชุดเดียว โดยค่าถ่วงน้ำหนักมีการปรับแบบอัตโนมัติ ไม่มีการเปรียบเทียบกับข้อมูลเป้าหมาย

การเรียนรู้แบบเสริม (Reinforcement learning) จัดเป็นการเรียนรู้แบบมีการสอนพิเศษ ซึ่งไม่มีการใช้ตัวแปรเป้าหมายในการพิจารณาปรับค่าถ่วงน้ำหนัก แต่ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักนั้น ทำได้โดยการใช้ข้อกำหนดต่างๆ เพื่อประเมินผลลัพธ์ของเครือข่ายให้สอดคล้องกับตัวแปรต้น ลักษณะการแบบเรียนรู้แบบเสริม เช่น เครือข่ายประสาทเทียมที่มีการใช้เจเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithms, GA) ในการหาค่าถ่วงน้ำหนัก

รูปแบบการสอนของเครือข่ายประสาทเทียมขึ้นอยู่กับข้อมูลที่เครือข่ายประสาทเทียม ได้รับ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับงานที่แตกต่างกันออกไปเช่น การประมาณค่าผลลัพธ์ต่างๆ จาก

ข้อมูลในอดีตซึ่งเหมาะสมกับเครือข่ายประสาทเทียมที่มีการสอน หรือการจำแนกสิ่งของต่างๆ ออกจากกัน ต้องอาศัยข้อกำหนดจากข้อมูลต่างๆ ซึ่งเหมาะสมกับเครือข่ายประสาทเทียมที่ไม่มีการสอน ในงานวิจัยเครือข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นเป็นแบบมีการสอน กล่าวคือ การนำผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองหรือการวิเคราะห์มาใช้เป็นข้อมูลในการสอนเพื่อให้เครือข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายคำตอบได้อย่างแม่นยำ

6.2 การศึกษางานวิจัยที่ประยุกต์ใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

จากประสิทธิภาพในการทำนายของเครือข่ายประสาทเทียม ดังที่ได้กล่าวมา จึงได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต ยกตัวอย่างเช่น การทำนายการบิดเบี้ยวหรือเสียรูปร่างของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยมีอุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิหลอมเหลว เวลาที่ใช้แรงดันคงค้าง และเวลาในการเย็นตัวของชิ้นงาน ที่แตกต่างกัน (Kenig, 2001) การประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรม เพื่อหาปัจจัยที่ ใช้เวลาและพลังงานในการขึ้นรูปน้อยที่สุด (Sadeghi, 2000) และการทำนายความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์เมื่อผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยใช้ตัวแปรที่ต่างกัน (Kenig, 2001; Zhou and Li, 2005) เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้มีการนำเครือข่ายประสาทเทียมมาทำนายสมบัติของวัสดุอย่าง เช่น การหาค่าเวลาในการคงรูปยางที่เหมาะสม (Karaagac *et al.*, 2008) ใช้ทำนายสมบัติการไหลของยางที่มีการใส่สารเคมีต่างกัน (Padmavathi *et al.*, 2005; Demirhan *et al.*, 2006) และการทำนายการหดตัวของยางที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป (Chookaew *et al.*, 2007) เป็นต้น จากงานวิจัยดังที่ได้กล่าวมาพบว่าเครือข่ายประสาทเทียมเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและผลลัพธ์ โดยเฉพาะกรณีที่ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ซึ่งใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ได้ยาก เช่น ในกรณีการทำนายตำแหน่งของรอยประสาน ซึ่งไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ จึงจำเป็นต้องใช้โปรแกรมจำลองการไหล หรือเครือข่ายประสาทเทียม ในการทำนายตำแหน่งของรอยประสานในกระบวนการอัดสัง (Soltani and Manoochehri, 1999)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.1 ขางธรรมชาติเกรด 5L
- 1.2 สารเคมีที่ใช้ในการบดผสม
 - 1.2.1 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO)
 - 1.2.2 กรดสเตียริก (Stearic acid)
 - 1.2.3 กำมะถัน (Sulphur)
 - 1.2.4 ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide, CBS)
 - 1.2.5 พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG)
 - 1.2.6 น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil)
 - 1.2.7 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)
 - 1.2.8 เขม่าดำ (Carbon black)
 - 1.2.9 ซิลิกา (Silica)

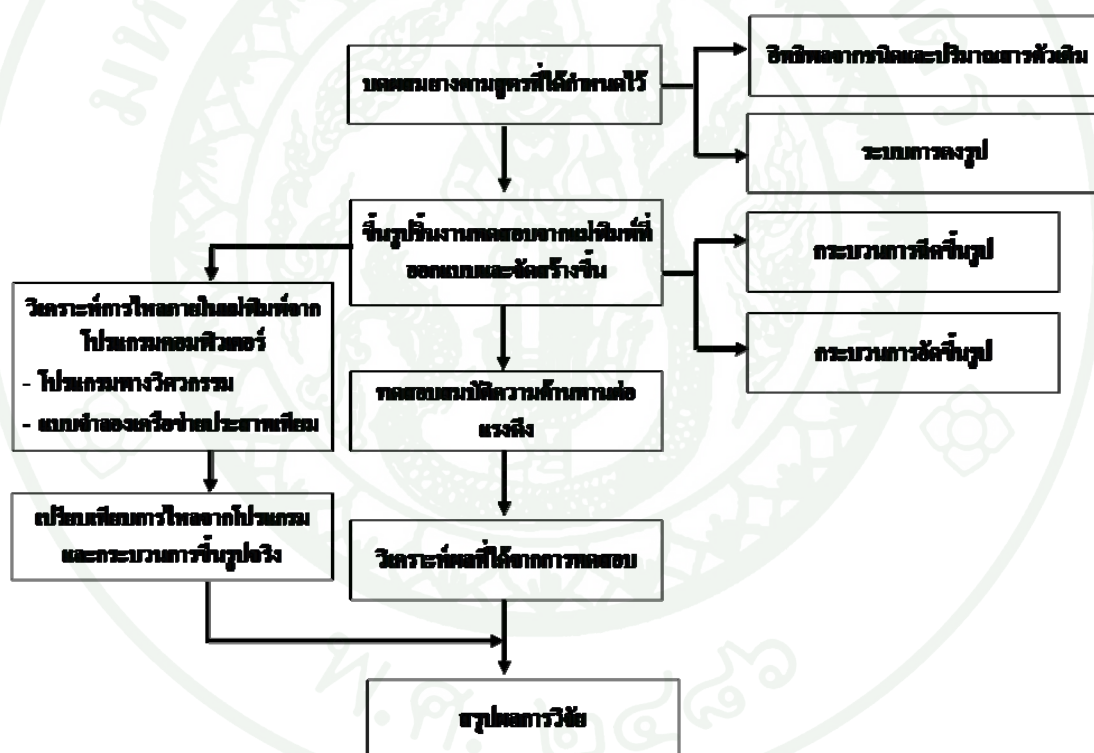
2. เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 2.2 เครื่องบดผสมระบบปิด (Internal mixer)
- 2.3 เครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)
- 2.4 เครื่องทดสอบความหนืดมูนีของยาง (Mooney viscometer)
- 2.5 เครื่องทดสอบหาเวลาในการคงรูปของยาง (Moving Die Rheometer, MDR)
- 2.6 เครื่องวัดความหนาขึ้นงานทดสอบ
- 2.7 เครื่องมือทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง
- 2.8 เครื่องตัดยางระบบไฮดรอลิก
- 2.9 เครื่องตัดตัวอย่างยางแบบใช้กำลังลม

- 2.10 เครื่องฉีดขึ้นรูปยาง (Rubber injection machine)
- 2.11 เครื่องอัดขึ้นรูปยาง (Rubber compression machine)
- 2.12 แม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงรอยประสาน
- 2.13 แม่พิมพ์อัดรูปชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงรอยประสาน
- 2.14 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเพื่อเก็บตำแหน่งรอยประสาน
- 2.15 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในการจำลองการไหลภายในแม่พิมพ์ Cadmould เวอร์ชัน 2.0
- 2.15 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม Neurosolution เวอร์ชัน 4.5

วิธีการ

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยนี้แสดงในภาพที่ 22 โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสานในกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ปัจจัยที่ได้ทำการศึกษาแบ่งออกเป็น ปัจจัยที่มาจากสารเคมีของยาง ได้แก่ ระบบการคงรูป ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม ปัจจัยในกระบวนการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิและแรงดันปิดแม่พิมพ์ โดยใช้แม่พิมพ์ฉีดและแม่พิมพ์อัดที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานที่มีและไม่มีรอยประสาน จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง นอกจากนี้ยังศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมในการวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์



ภาพที่ 22 แผนผังการวิจัย

1. การเตรียมยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ โดยชนิดของสารตัวเติมที่ได้

ทำการศึกษา ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ ที่ปริมาณ 15 30 45 และ 60 phr ตามลำดับ ในกรณีของการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ฉีด เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องจักรที่ใช้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาอัตราส่วนผสมในปริมาณ 15 และ 30 phr นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของระบบการคงรูป ซึ่งได้แก่ ระบบการคงรูปแบบ CV และ EV โดยเติมเขม่าดำที่ 60 phr สูตรยางที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สูตรยางที่ใช้ในงานวิจัย (phr*)

Materials		Filler types		Vulcanization systems	
				CV	EV
STR5L		100		100	
Stearic acid		2		2	
ZnO		4		4	
Sulfur		2.4		2.4	0.8
CBS		0.8		0.8	2.4
CaCO ₃	0/15/30/45/60	-	-	-	-
Silica	-	0/15/30/45/60	-	-	-
Carbon black	-	-	0/15/30/45/60	60	60
PEG	-	0/0.9/1.8/2.7/3.6	-	-	-
Aromatic oil	-	-	0/1/2/3/4	4	4

*phr = part per hundred of rubber

ขั้นตอนการบดผสมยางเริ่มจาก นำยางธรรมชาติมาบดด้วยเครื่องบดผสมระบบปิด ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้ยางนิ่ม จากนั้นเติม ZnO และ Stearic Acid บดผสมต่ออีก 1 นาที จากนั้นใส่สารตัวเติมครึ่งละหนึ่งในสามของทั้งหมด ใช้เวลาในการบดผสม 1 นาที ใส่ทั้งหมด 3 ครั้ง บดผสมต่อไปจนครบเวลา 11 นาที ในกรณีของเขม่าดำขั้นตอนนี้มีการใส่น้ำมันอะโรมาติก เพื่อช่วยการกระจายตัวให้บดผสมง่ายขึ้น ส่วนซิลิกาใช้การผสม PEG เพื่อป้องกันซิลิกาดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาและสารทำให้เกิดการคงรูป นำสารประกอบยางธรรมชาติที่ได้มาบดต่อด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง ใช้อุณหภูมิลูกกลิ้ง 70 °C ใส่สารตัวเร่งแล้วจึงบดผสมเป็นเวลา 1

นาที่ จากนั้นจึงใส่ก้ามะถันและบดผสมต่อเป็นเวลา 3 นาที โดยในขณะการบดผสมต้องใช้มีดกรีด
ยางเพื่อให้สารเคมีทั้งหมดผสมเข้ากันทั่วถึง

ยางที่ผ่านการบดผสมแล้ว นำไปทดสอบค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ตาม
มาตรฐาน ASTM D1646 และหาเวลาในการคงรูปที่ 90 เปอร์เซนต์ จากเครื่อง MDR ตามมาตรฐาน
ASTM D5289 โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 140 150 160 และ 170 °C ตามลำดับ ทั้งนี้ชิ้นงานที่ได้
จากการขึ้นรูปนำมาทดสอบหาความต้านทานต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D412

1.1 การทดสอบค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)

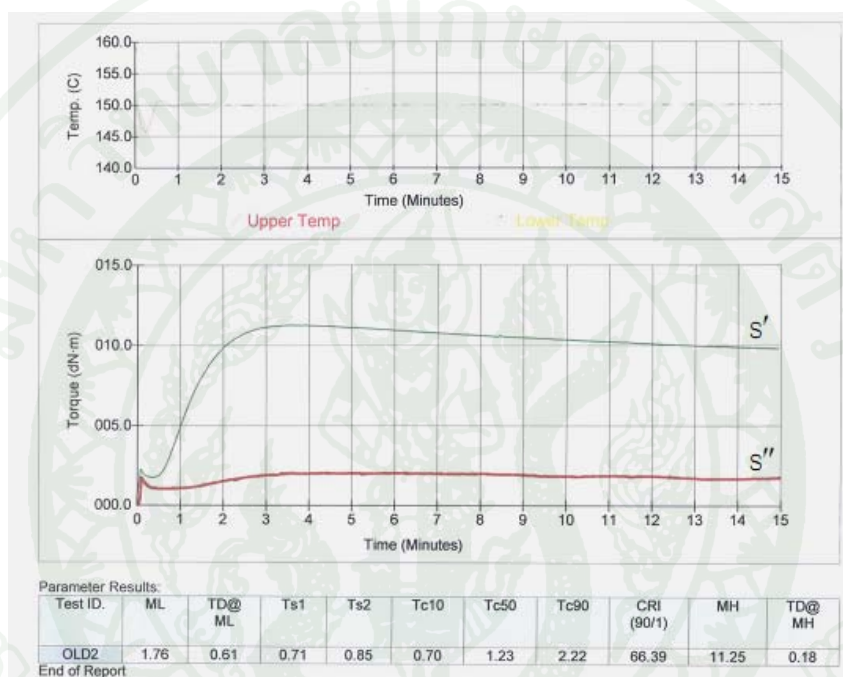
การทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ สามารถทดสอบด้วยเครื่องวัดความ
หนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) ตามมาตรฐาน ASTM D1646 ค่าความหนืดที่วัดได้เรียกว่าความ
หนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) หลักการทำงานของเครื่องวัดความหนืดมูนนี่คือ นำยางคอมพาวนด์
วางในห้องทดสอบ โดยมีจานโลหะ (Rotor) หมุนด้วยความเร็วคงที่เท่ากับ 2 ± 0.02 รอบต่อนาที
อุณหภูมิที่ใช้คือ 100 °C และ การหมุนของจานโลหะที่มียางห่อหุ้มอยู่ ทำให้เกิดแรงบิด (Torque)
ซึ่งมีไมโครมิเตอร์เป็นตัววัดขนาดของการเคลื่อนที่ดังกล่าวออกมาเป็นหน่วย ที่เรียกว่า ค่าความ
หนืดมูนนี่ (Mooney viscosity, MV) โดยกำหนดให้แรงบิดขนาด 8.30 ± 0.02 นิวตัน-เมตร เทียบเท่า
กับค่าความหนืด 100 มูนนี่ โดยการรายงานผลการทดสอบแสดงดังตัวอย่าง

50 ML 1+4 (100°C)

โดยที่	50 M	=	ค่า Mooney Viscosity ของยาง
	L	=	จานหมุนขนาดใหญ่ (ถ้าใช้จานหมุนขนาดเล็กให้ใช้อักษร S)
	1	=	เวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการอุ่นยาง
	4	=	เวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการทดสอบและวัดค่าความหนืดนั้น
	100°C	=	อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ

1.2 การทดสอบการคงรูปของยางคอมพาวนด์ (Cure characteristic)

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยาง ได้แก่ เครื่อง Moving die rheometer (MDR) ตามมาตรฐาน ASTM D5289 โดยวัดค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้นจากการหมุนสลัปไปมาของจานหมุน ในขณะที่ยางคอมพาวนด์เกิดปฏิกิริยาการคงรูปเมื่อได้รับความร้อนจากห้องทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 23

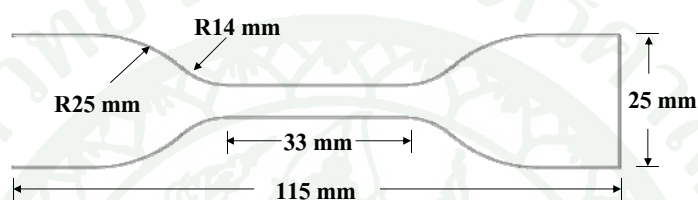


ภาพที่ 23 ผลการทดสอบหาเวลาการคงรูปจากเครื่อง MDR

- โดย ML = ค่าแรงบิดที่ความยืดหยุ่นต่ำสุด
 MH = ค่าแรงบิดที่ความยืดหยุ่นสูงสุด
 Ts1 = เวลาที่ยางเริ่มเกิดปฏิกิริยาการคงรูป จุดที่ 1 (Scorch time 1)
 Ts2 = เวลาที่ยางเริ่มเกิดปฏิกิริยาการคงรูป จุดที่ 2 (Scorch time 2)
 Tc10 = เวลาที่ยางเกิดปฏิกิริยาการคงรูปไป 10 % คำนวณจาก $ML + 0.1 (MH - ML)$
 Tc50 = เวลาที่ยางเกิดปฏิกิริยาการคงรูปไป 50 % คำนวณจาก $ML + 0.5 (MH - ML)$
 Tc90 = เวลาที่ยางเกิดปฏิกิริยาการคงรูปไป 90 % คำนวณจาก $ML + 0.9 (MH - ML)$
 CRI = อัตราเร็วในการคงรูป (Cure rate index) คำนวณจาก $100/(tc90-ts1)$

1.3 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

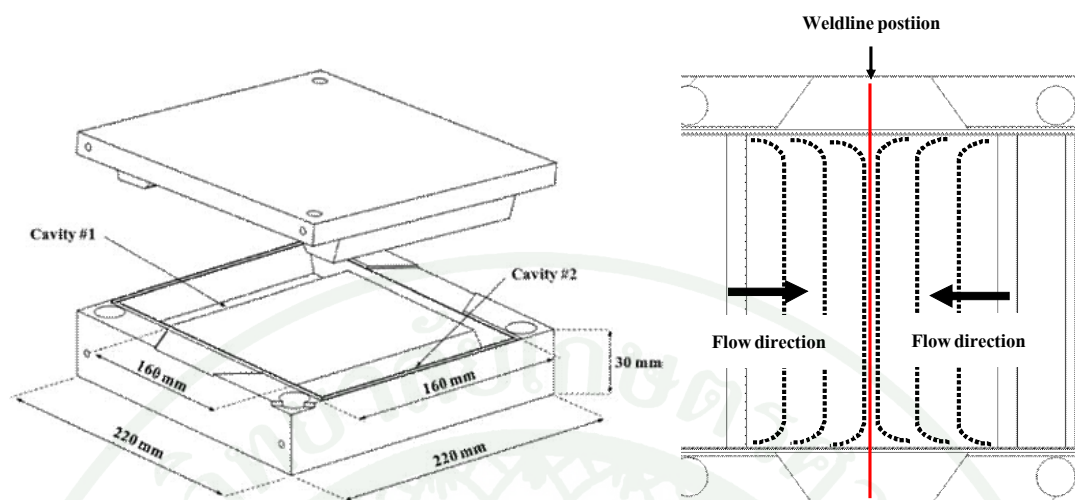
การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูป เริ่มจากการตัดชิ้นงานให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D412 (Die C) ดังแสดงในภาพที่ 24 โดยใช้เครื่องตัดแบบใช้กำลังลม จากนั้นจึงนำไปทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง โดยใช้ความเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที



ภาพที่ 24 ขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D412 (Die C)

2. การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบจากแม่พิมพ์ที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น

แม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น แม่พิมพ์อัดและแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูป โดยทั้ง 2 แบบใช้เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่มีรอยประสานและไม่มีรอยประสาน โดยในกรณีของแม่พิมพ์อัด ได้ออกแบบให้มีตำแหน่งการวางยางคอมพาวนด์ที่แต่ละด้านของแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 25 เมื่อทำการอัดชิ้นงาน ยางในแต่ละด้านสามารถไหลตามเบ้าแม่พิมพ์มาประสานกันที่บริเวณตรงกลาง เกิดเป็นรอยประสานขึ้น ในกรณีของการขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน ใช้การวางยางคอมพาวนด์เพียงด้านเดียวเพื่อให้ยางไหลเต็มเบ้าพิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 26 โดยภาพที่ 27 แสดงชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป ทั้งนี้ได้มีการศึกษาตัวแปรที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป ได้แก่ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ 150 °C และ 170 °C และแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 3, 4.5 และ 6 MPa ตามลำดับ



ภาพที่ 25 แม่พิมพ์อัดที่ออกแบบเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรอยประสาน



(ก)



(ข)

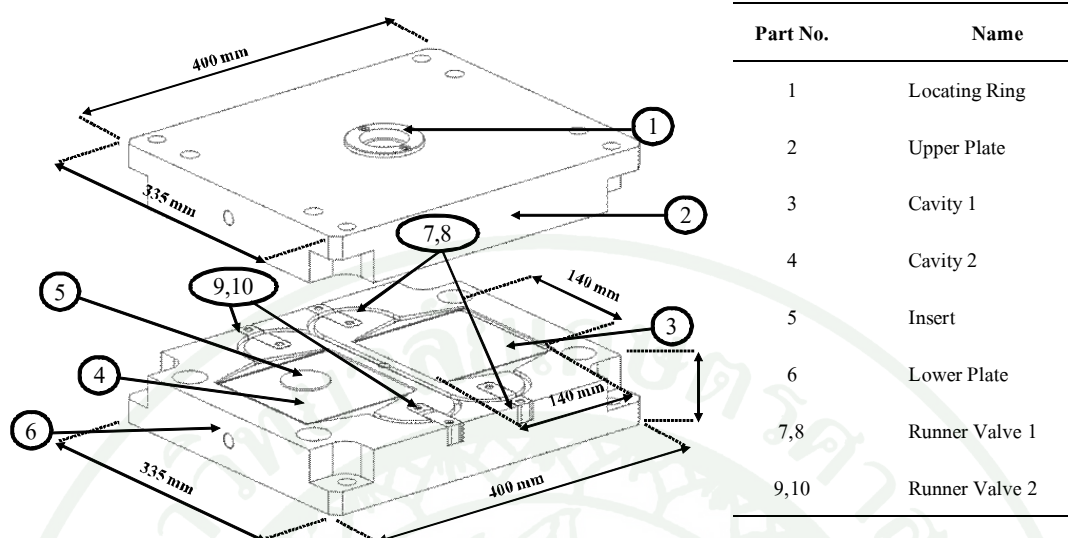
ภาพที่ 26 การวางยางคอมพาวด์เริ่มต้น (ก) สำหรับการอัดขึ้นรูปชิ้นงานยางที่มีรอยประสาน
(ข) สำหรับการอัดขึ้นรูปชิ้นงานยางที่ไม่มีรอยประสาน



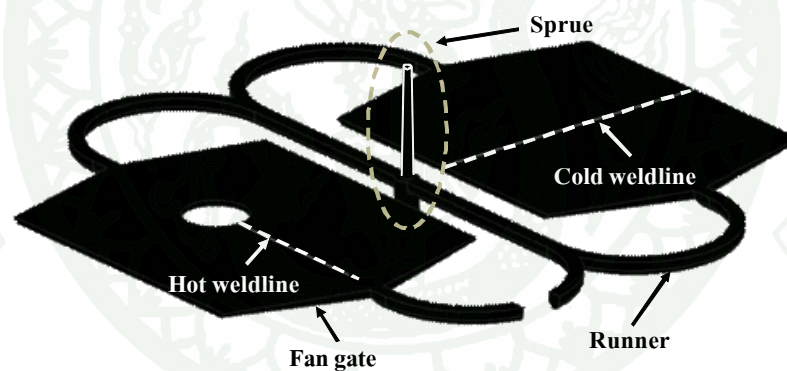
ภาพที่ 27 ชิ้นงานยางที่มีรอยประสานและชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

ในกรณีของการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงของรอยประสาน ทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีดที่สามารถผลิตชิ้นงานที่เกิดรอยประสานแบบร้อน และแบบเย็น ดังแสดงในภาพที่ 29 และ 30 ซึ่งในกรณีของการเกิดรอยประสานร้อน อาศัยหลักการปิดทางเข้าในตำแหน่งที่ 2 เพื่อให้ยางคอมพาวนด์ไหลแยกผ่านอินเลอร์และมาบรรจบกันเกิดเป็นรอยประสานขึ้นในเบ้าแม่พิมพ์ที่ 1 ในขณะที่การเกิดรอยประสานเย็นมีลักษณะการขึ้นรูปที่คล้ายคลึงกับกระบวนการอัดขึ้นรูป กล่าวคือ เกิดจากการไหลของยางคอมพาวนด์จากตำแหน่งทางเข้าที่ 7 และ 8 ซึ่งทำให้เกิดรอยประสานบริเวณกลางชิ้นงาน ทั้งนี้เมื่อขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานสามารถทำได้โดยปิดทางเข้าตำแหน่งที่ 7 หรือ 8 ซึ่งทำให้ยางคอมพาวนด์สามารถไหลเข้าเบ้าแม่พิมพ์ที่ 2 ได้ทางเดียว ชิ้นงานที่ได้จากการฉีดนำไปตัดเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน เพื่อทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 30

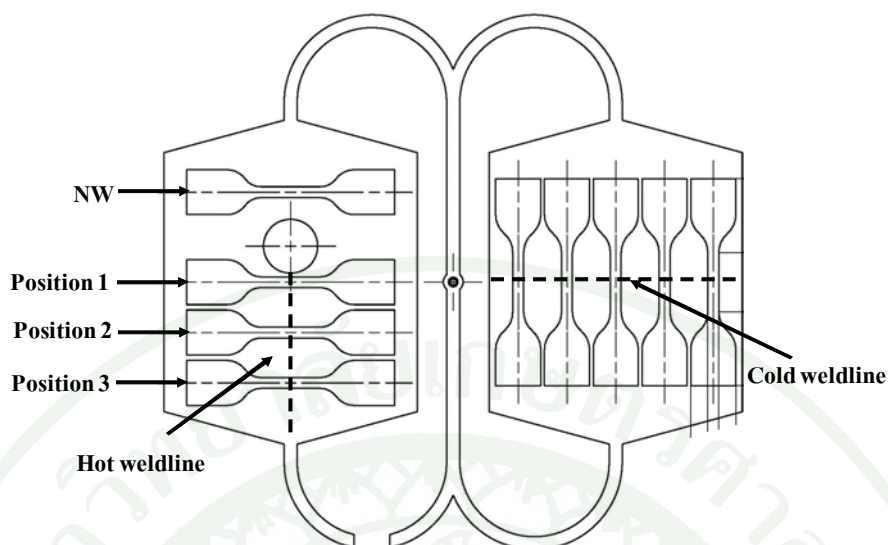
การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการฉีดขึ้นรูป มีข้อจำกัดในด้านเครื่องที่ใช้ ซึ่งในกระบวนการฉีดจริง ต้องใช้แรงดันในการฉีด (Injection pressure) และแรงดันปิดแม่พิมพ์ (Clamping force) สูงสุดของเครื่อง เพื่อให้สามารถฉีดขึ้นรูปชิ้นงานเต็มแบบได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเฉพาะอิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ ที่มีต่อความแข็งแรงของรอยประสาน โดยศึกษาที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ฉีดเท่ากับ 140 150 และ 160 °C ตามลำดับ



ภาพที่ 28 แม่พิมพ์ฉีดที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น



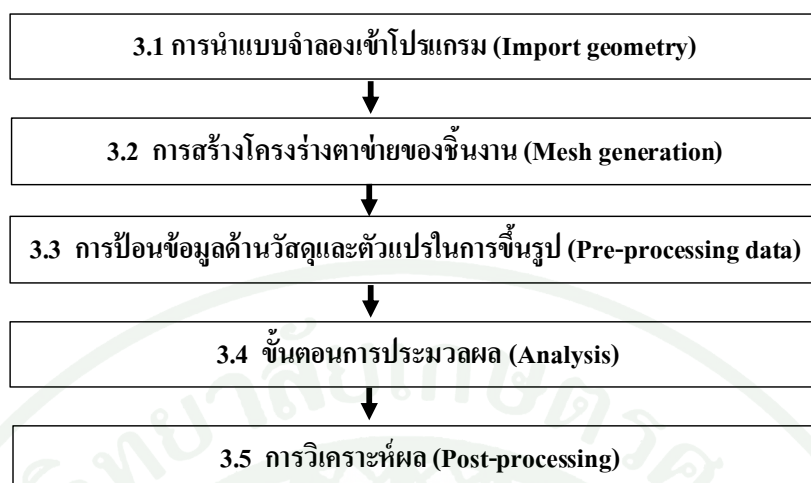
ภาพที่ 29 ชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูป



ภาพที่ 30 ตำแหน่งของชิ้นงานที่นำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด

3. การวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

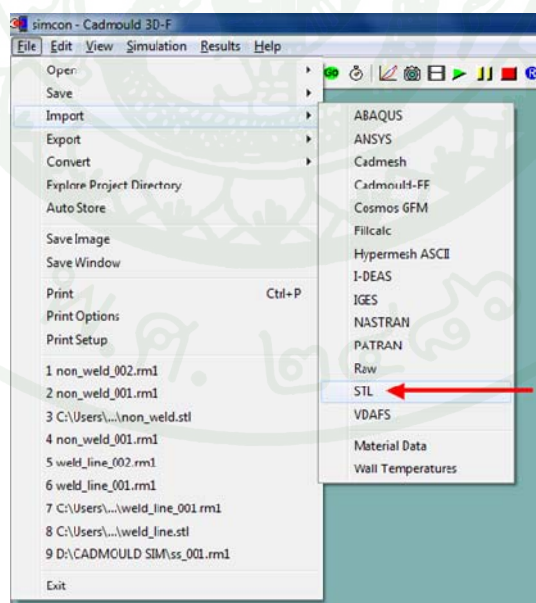
งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Cادمould เวอร์ชัน 2.0 เพื่อวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งวัสดุยาง และเทอร์โมพลาสติก ทั้งนี้การวิเคราะห์โดยโปรแกรม Cادمould เป็นการวิเคราะห์แบบ 2.5 มิติ ซึ่งมีการแบ่งเอลิเมนต์เฉพาะที่ผิวของชิ้นงาน ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ได้รวดเร็ว ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลโดยใช้โปรแกรม Cادمould แสดงในภาพที่ 31 โดยเริ่มจากการนำแบบจำลองของชิ้นงานเป็นไฟล์ CAD ซึ่งเป็นนามสกุลที่โปรแกรมสนับสนุนเข้ามา จากนั้นจึงทำการสร้างโครงร่างตาข่ายโดยแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ และให้ข้อมูลด้านวัสดุ (Material data) และตัวแปรในกระบวนการฉีดขึ้นรูปเพื่อจำลองการไหลภายในแม่พิมพ์



ภาพที่ 31 ขั้นตอนการจำลองการไหล โดยใช้โปรแกรม Cadmould เวอร์ชัน 2.0

3.1 การนำแบบจำลองเข้าโปรแกรม (Import geometry)

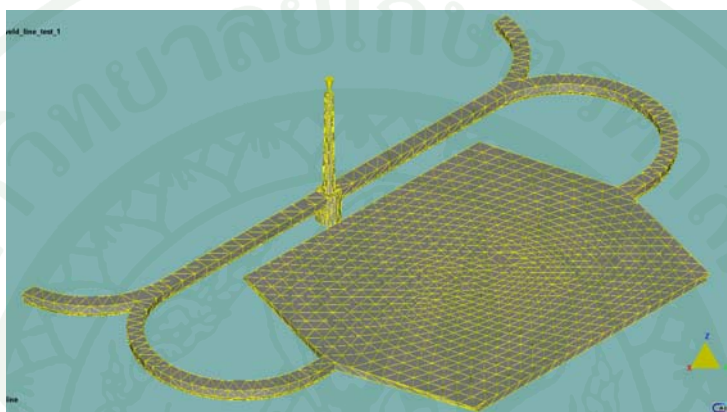
จากหน้าจอเริ่มต้นของโปรแกรม Cadmould ทำการนำเข้าแบบจำลองของผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบขึ้นโดยใช้โปรแกรม Unigraphics ทั้งนี้นามสกุลที่สามารถใช้ได้แสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 32 การนำแบบจำลองสามมิติของแม่พิมพ์เข้ามาในโปรแกรม Cadmould

3.2 การสร้างโครงร่างตาข่ายของชิ้นงาน (Mesh generation)

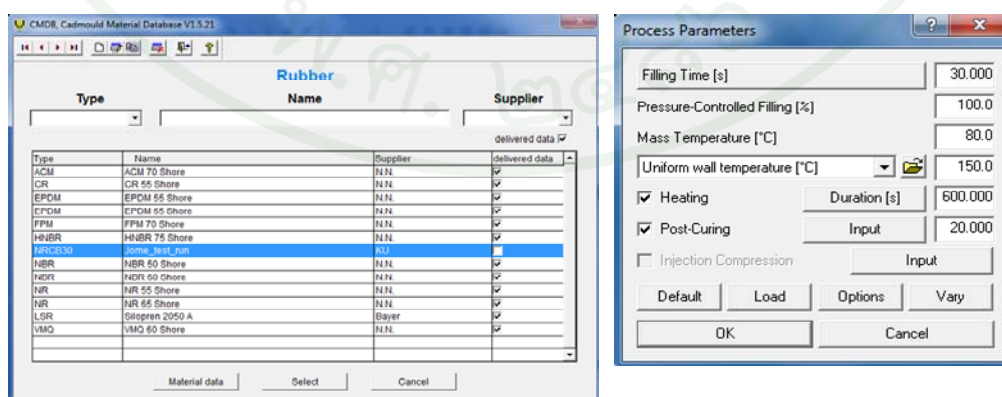
เมื่อนำแบบจำลองสามมิติของชิ้นงานเข้ามาในโปรแกรมแล้ว จึงทำการสร้างโครงร่างตาข่ายของชิ้นงาน โดยแบ่งเอลิเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 33 ทั้งนี้ขนาดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมควรมีอัตราส่วนระหว่างความกว้างและความยาว (Aspect ratio) ไม่เกิน 15 (Shoemaker, 2008)



ภาพที่ 33 แบบจำลองหลังการสร้างโครงร่างตาข่าย

3.3 การป้อนข้อมูลตัวแปรต้น (Pre-processing)

หลังจากการสร้างโครงร่างตาข่าย จึงทำการเลือกชนิดของยางที่ใช้ในการวิเคราะห์ รวมไปถึงกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 34



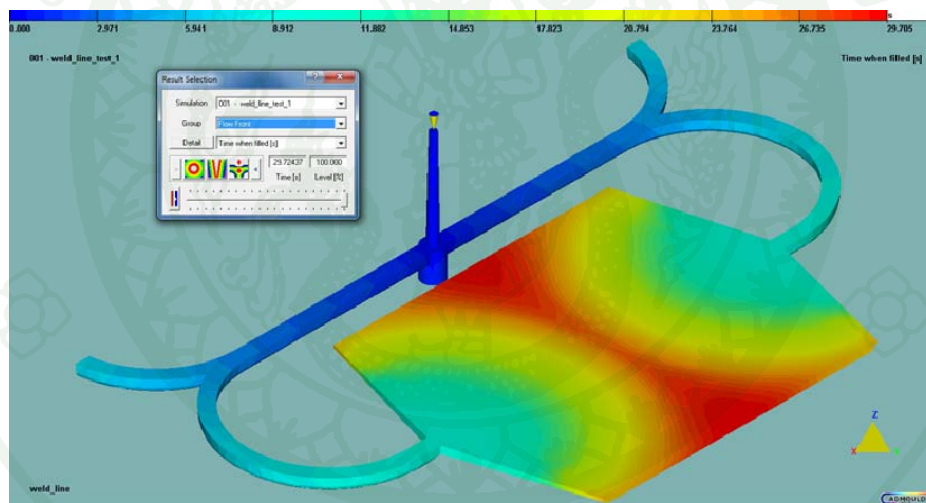
ภาพที่ 34 ข้อมูลของวัสดุและตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้วิเคราะห์

3.4 ขั้นตอนการประมวลผล (Analysis)

ขั้นตอนการประมวลผล เป็นการแก้ไขปัญหาจากตัวแปรต้นที่ป้อนให้กับโปรแกรม โดยเป็นการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน ทั้งนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรมขึ้นอยู่กับจำนวนของเอลิเมนต์ และประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์

3.5 การวิเคราะห์ผล (Post-processing)

หลังจากขั้นตอนการประมวลผล สามารถเลือกการแสดงผลที่เกิดจากการไหลของยาง ภายในแม่พิมพ์ได้ เช่น อุณหภูมิของชิ้นงาน แรงดันฉีดและอัตราการไหลที่เกิดขึ้น รวมไปถึง ตำแหน่งของรอยประสานหรือจุดที่อากาศค้างภายในชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 35

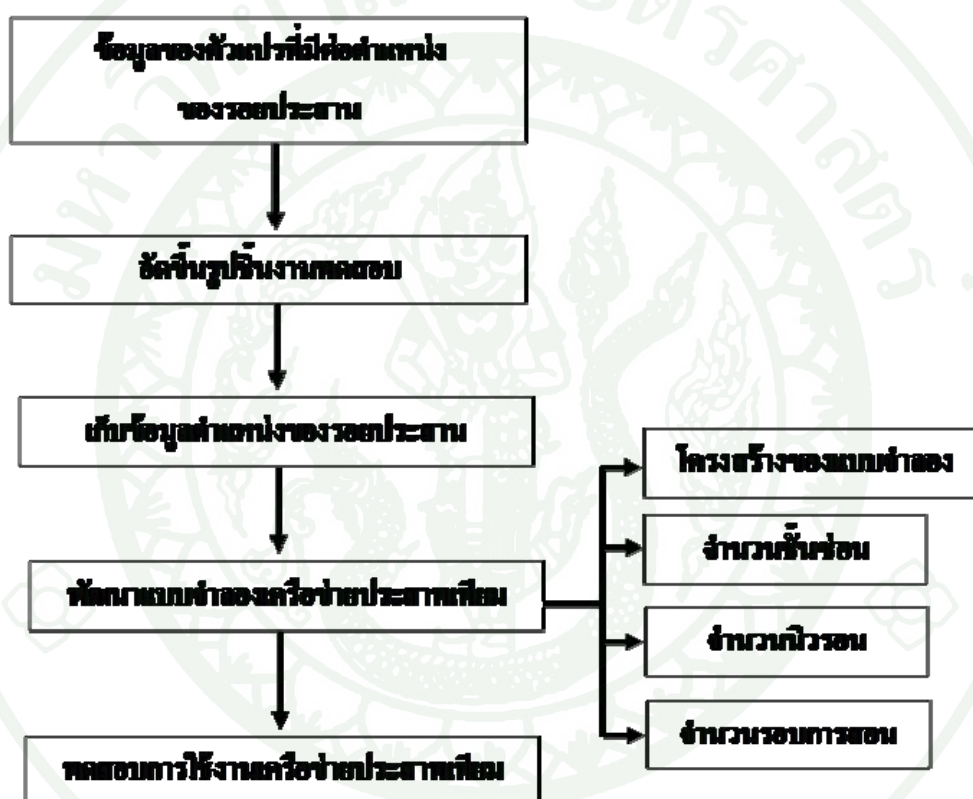


ภาพที่ 35 ผลจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Cadmould

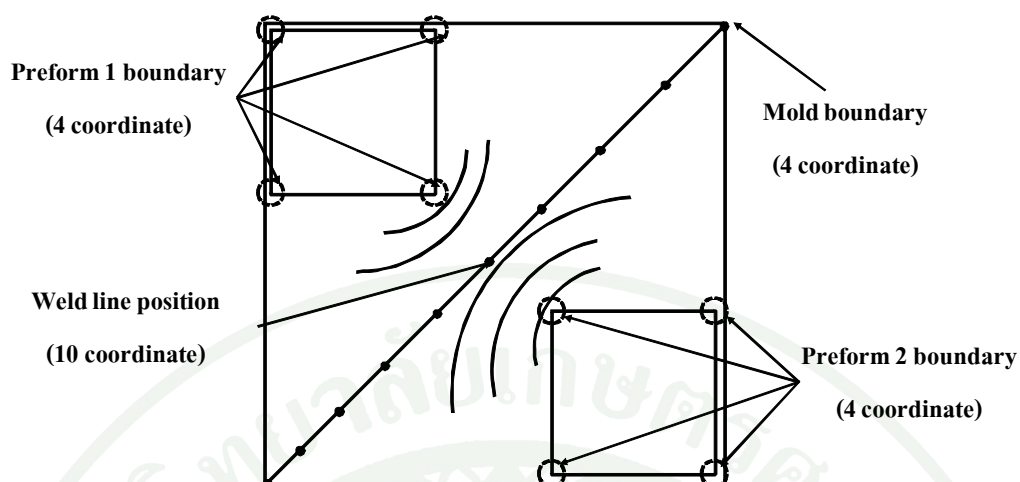
4. การสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

กระบวนการสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายตำแหน่งของรอยประสาน ในกระบวนการอัดขึ้นรูป ในกรณีที่มีชิ้นงานเริ่มต้น 2 ตำแหน่ง มีขั้นตอนการพัฒนาดังแสดงใน ภาพที่ 36 ซึ่งกำหนดให้ ขอบเขตของแม่พิมพ์ ขอบเขตของชิ้นงานเริ่มต้น เป็นตัวแปรต้น ในขณะที่ ตำแหน่งของรอยประสานเป็นผลลัพธ์หรือตัวแปรตามที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ตำแหน่งของตัวแปรต้นและตัว

แปรตามถูกเก็บอยู่ในรูปพิกัด X, Y ดังแสดงในภาพที่ 37 โดยข้อมูลที่ใช้สอนได้แก่ ขอบเขตของแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นพิกัดขอบเขต 4 จุด (8 ตัวแปร) ขอบเขตของชิ้นงานเริ่มต้น 2 ตำแหน่ง แต่ละชิ้นมีพิกัดของเขต 4 จุด (16 ตัวแปร) และตัวแปรตามได้แก่ พิกัดตำแหน่งของรอยประสาน 10 จุด (20 ตัวแปร) ซึ่งรูปแบบการวางชิ้นงานเริ่มต้น 200 รูปแบบ แบ่งเป็นข้อมูลที่ใช้ในการสอน 160 รูปแบบ และข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองเครือข่าย 40 รูปแบบ โดยในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบได้ใช้แม่พิมพ์ที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 38



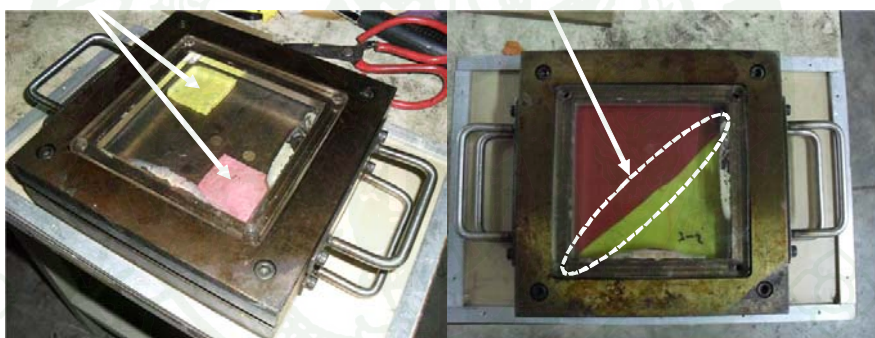
ภาพที่ 36 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม



ภาพที่ 37 การเก็บตำแหน่งเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

Compound position

Weldline position



ภาพที่ 38 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการเก็บตำแหน่งของรอยประสาน

จากตำแหน่งของรอยประสานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ที่มีรูปแบบแตกต่างกัน นำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม โดยตัวแปรของแบบจำลองที่ได้ทำการปรับเปลี่ยน ได้แก่ จำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Number of neuron in hidden layer) อัตราการเรียนรู้ (Learning rate) จำนวนรอบการสอน (Epoch) โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแปรต่างๆ บอกเป็นค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean square error, MSE) ระหว่างข้อมูลของตัวแปรตามที่ใช้สอนและข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ซึ่งเป็นตัวบอกความแม่นยำของการนำเครือข่ายประสาทเทียมไปใช้งาน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 การทดลอง ได้แก่

การทดลองที่ 1 เป็นการเลือกแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมในการทำนายตำแหน่งของรอยประสาน ซึ่งแบบจำลองที่เลือกมา ได้แก่ แบบจำลอง Multilayer perception แบบจำลอง Generalized feed forward และแบบจำลอง Recurrent network

การทดลองที่ 2 เพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกหัดที่เหมาะสมในการสอนเครือข่ายประสาทเทียม โดยใช้ระดับของอัตราการเรียนรู้ 4 ระดับ และจำนวนรอบการสอน 7 ระดับ

การทดลองที่ 3 เป็นการทดลองเพื่อหาจำนวนชั้นซ่อนที่เหมาะสม ซึ่งส่วนใหญ่กำหนดที่ 1 2 หรือ 3 ชั้นซ่อน

การทดลองที่ 4 เป็นการทดลองเพื่อหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่เหมาะสม โดยช่วงของจำนวนนิวรอนที่เหมาะสมแสดง ดังแสดงในสมการที่ 2 และ 3 (Abu-Sahra, 2003) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์จำนวนนิวรอน 22 ถึง 49 นิวรอน ที่มีต่อความแม่นยำของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

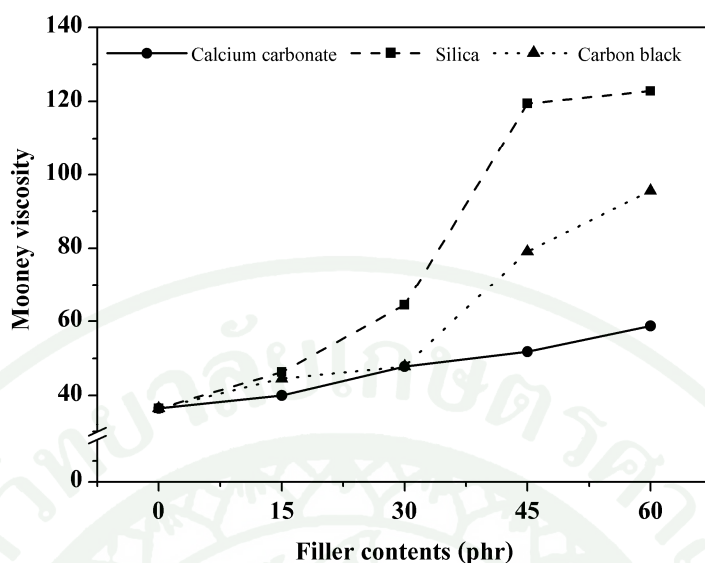
$$\text{จำนวนนิวรอนที่น้อยที่สุด} = \text{จำนวนตัวแปรตาม} + \text{จำนวนตัวแปรต้น} \quad (2)$$

$$\text{จำนวนนิวรอนที่มากที่สุด} = 2 (\text{จำนวนตัวแปรตาม}) + 1 \quad (3)$$

ผลและวิจารณ์

1. อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลและสมบัติการคงรูปเมื่ออบผสมเข้ากับยางธรรมชาติ

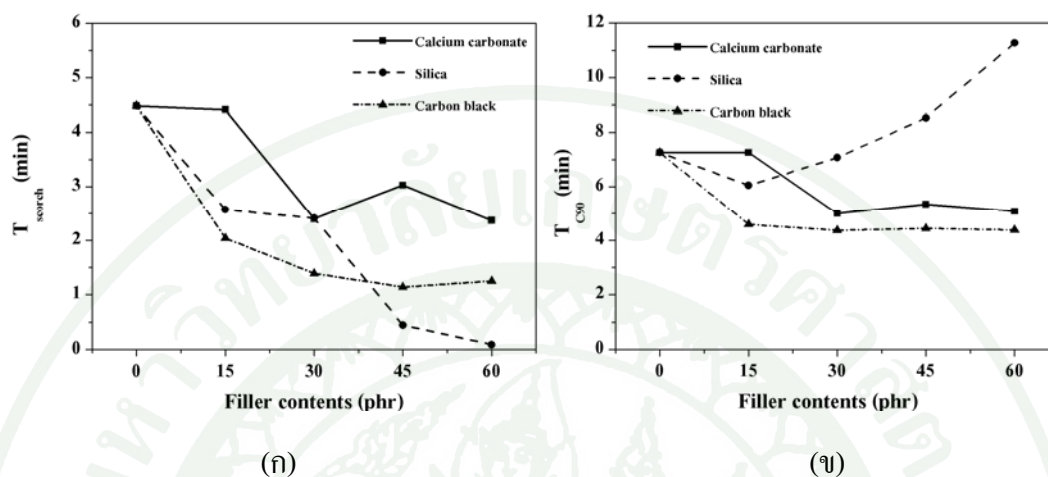
จากผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่าความหนืดมูนนี้ของยางธรรมชาติดังแสดงในภาพที่ 39 พบว่ายางที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตมีความหนืดเพิ่มขึ้นไม่มากนักเมื่อเทียบกับซิลิกาและเขม่าดำ ในอัตราส่วนผสมที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องมาจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และไม่มีอันตรกิริยา (Interaction) กับเนื้อยาง (Barrow, 1993) ดังนั้นจึงเป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง ในขณะที่เขม่าดำและซิลิกามีขนาดอนุภาคที่เล็กจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเนื้อยางมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต จึงสามารถกระจายตัวในเนื้อยางได้ดี นอกจากนี้ที่ผิวของเขม่าดำมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) คาร์บอกซิล (Carboxyl) และแลคโตน (Lactone) หรือกรณีของซิลิกาที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol) (Hofmann, 1988) ส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและเนื้อยางเพิ่มสูงขึ้น ความหนืดของยางจึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความหนืดของยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำและซิลิกา พบว่ายางที่เติมซิลิกามีค่าความหนืดที่มากกว่าเขม่าดำ ทั้งนี้เนื่องจากการยึดเกาะรวมกันเป็นกลุ่ม (Agglomerates) ของซิลิกา ด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งทำให้ซิลิกามีโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น ส่งผลให้ยางธรรมชาติมีความหนืดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าความหนืดมูนนี้ของยางที่ผสมซิลิกา 45 และ 60 phr พบว่ามีค่าที่ไม่แตกต่างกัน ซึ่งอาจมีสาเหตุจากความแข็งของยางที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่ออบผสมซิลิกาที่ 60 phr ส่งผลให้ในขณะทำการทดสอบ เกิดการเลื่อนไถลของยางคอมพาวนด์จากจานทดสอบ ทำให้การวัดค่าแรงบิดที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง (Leblanc, 2002) ดังนั้นความหนืดที่วัดได้จึงมีค่าไม่แตกต่างจากซิลิกาที่ปริมาณ 45 phr



ภาพที่ 39 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่าความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อเวลาเริ่มคงรูป (Scorch time) พบว่าเมื่อปริมาณสารตัวเติมที่ใช้การบดผสมมากขึ้น เวลาเริ่มคงรูปมีแนวโน้มที่ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 40(ก) ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตทำหน้าที่เป็นตัวช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาในการคงรูปจากสมบัติความเป็นด่าง (Alkalinity) ซึ่งเกิดจากการปรับสภาพพื้นผิวด้วยซิงค์ออกไซด์ (พงษ์ธร, 2550; Hofmann, 1989) นอกจากนี้เขม่าดำที่บดผสม ส่งผลให้ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของยางเพิ่มสูงขึ้น จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้เร็วและทั่วถึงมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามที่ปริมาณซิลิกา 45 และ 60 phr เวลาเริ่มคงรูปของยางมีค่าที่ลดลงอย่างมาก ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความแข็งของยางที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงบิดที่สามารถวัดได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงทำให้ความแตกต่างระหว่างแรงบิดเพื่อคำนวณมาเป็นเวลาเริ่มคงรูปมีค่าน้อยมาก ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อเวลาการคงรูป (T_{C90}) ดังแสดงในภาพที่ 40(ข) พบว่าการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตและเขม่าดำให้ผลที่สอดคล้องกับเวลาเริ่มคงรูปของยางธรรมชาติเมื่อบดผสม กล่าวคือ เวลาในการคงรูปของยางมีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งเนื่องมาจากเหตุผลดังที่ได้กล่าวมา อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น พบว่าเวลาในการคงรูปของยางเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากโครงสร้างของซิลิกาที่มีความพรุน จึงดูดซับสารเคมีที่ช่วยกระตุ้นการคงรูป เช่น กรดสเตียริกและซิงค์ออกไซด์ ส่งผลให้เวลาในการคงรูปเพิ่มมากขึ้น (Ciesielski, 1999; Leblance, 2002; Rodgers and Waddell, 2005; Hewitt, 2007) ทั้งนี้พอลิเอทิลีนไกลคอลที่บดผสม

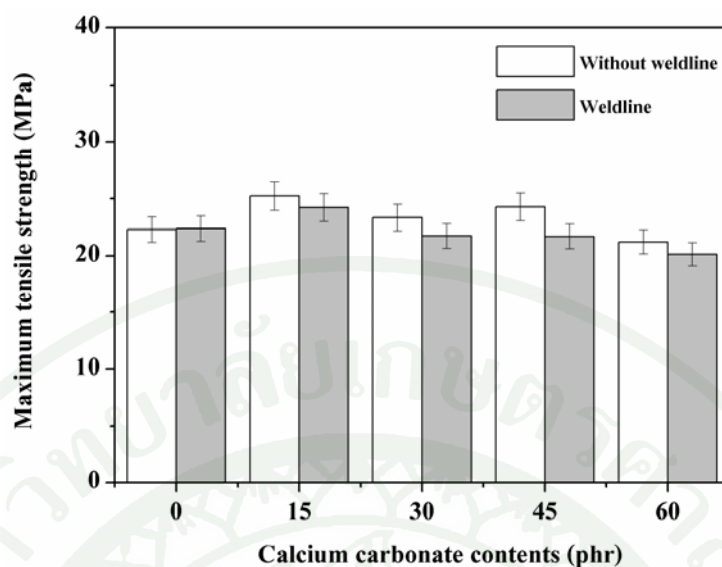
สามารถช่วยลดการดูดซับดังกล่าว ได้ในช่วงการบดผสมที่ปริมาณ 15 และ 30 phr ซึ่งเวลาในการคงรูปยังมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก



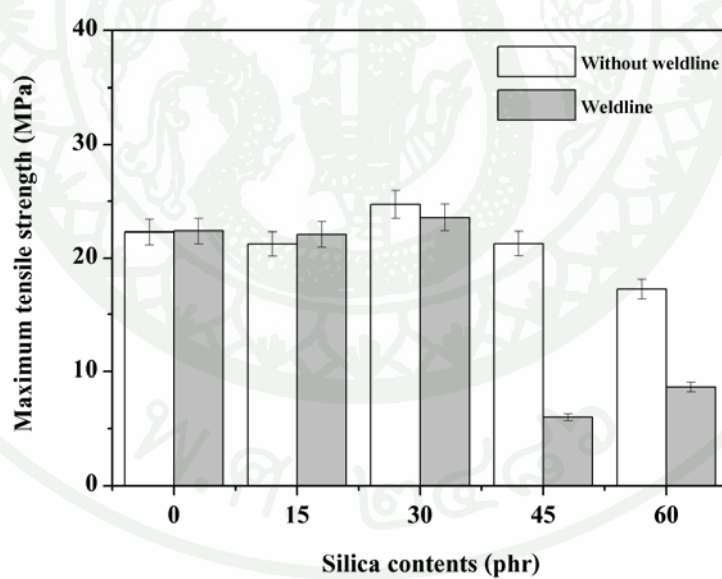
ภาพที่ 40 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการคงรูปเมื่อบดผสมเข้ากับยางธรรมชาติ (ก) เวลาเริ่มคงรูป (ข) เวลาคงรูปที่ 90 เปอร์เซ็นต์

2. อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

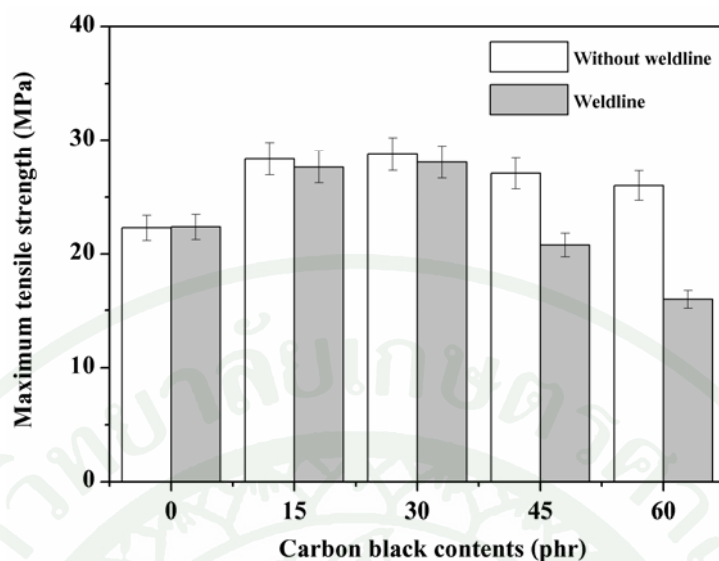
ภาพที่ 41 ถึง 43 แสดงอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน พบว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่บดผสมมากขึ้น ไม่ส่งผลต่อสมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุด เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง (Non reinforcing filler) ซึ่งทำหน้าที่ลดต้นทุนในกระบวนการผลิต (Hofmann, 1988) ในขณะที่การบดผสมซิลิกาและเขม่าดำที่ปริมาณ 15 และ 30 phr พบว่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากซิลิกาและเขม่าดำเป็นสารประเภทเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพและมีขนาดอนุภาคเล็ก รวมถึงมีหมู่ฟังก์ชันซึ่งทำให้เกิดอันตรกิริยากับเนื้อยาง ซึ่งช่วยในการเสริมแรง อย่างไรก็ตามพบว่าการบดผสมซิลิกาและเขม่าดำที่ปริมาณ 45 และ 60 phr ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากการเกาะรวมเป็นกลุ่มมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงลดลง



ภาพที่ 41 อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป



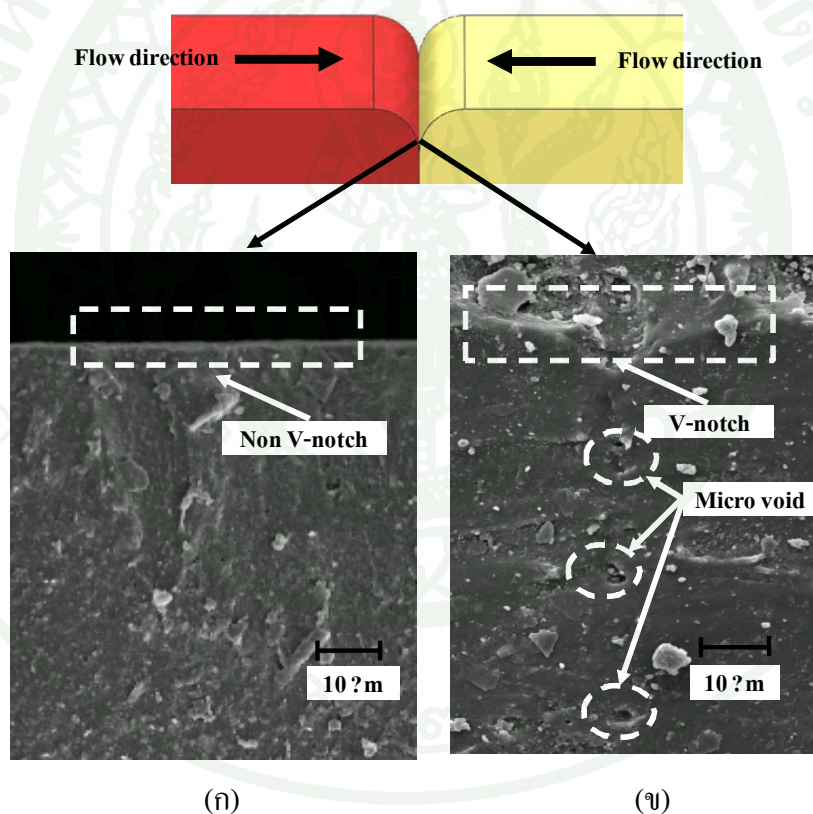
ภาพที่ 42 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป



ภาพที่ 43 อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานพบว่า ชิ้นงานยางธรรมชาติที่มีรอยประสานมีความแข็งแรงที่ไม่แตกต่างกับชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสานในกรณีที่ไม่ผสมสารตัวเติม ทั้งนี้มีสาเหตุจากอุณหภูมิเริ่มต้นของยางคอมพาวด์ที่ต่ำกว่าอุณหภูมิแม่พิมพ์ ส่งผลให้ยางมีเวลาในการไหลมาบรรจบกันบริเวณรอยประสานก่อนเวลาเริ่มคงรูป ดังนั้นจึงสามารถเกิดการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุล (Intermolecular diffusion) ได้มากขึ้น รวมถึงยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมมีความหนืดที่ต่ำกว่ายางที่ผสมสารตัวเติม จึงสามารถไหลและอัดตัว (Compressibility) ได้ง่ายภายในแม่พิมพ์ ส่งผลให้บริเวณหน้าสัมผัสของรอยประสานมีความหนาแน่นของเนื้อยางที่มาก จึงไม่พบร่องบากรูปตัววี (V-notch) ดังแสดงในภาพที่ 44(ก) ทั้งนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าร่องบากรูปตัววีเป็นสาเหตุหนึ่งซึ่งทำให้ความแข็งแรงบริเวณรอยประสานลดต่ำลง (Kim and Suh, 1986) นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีสมบัติยึดเกาะ (Tack properties) กันเองที่ดี (พงษ์ธร, 2550; วราภรณ์, 2552) ส่งผลให้ชิ้นงานที่เกิดรอยประสานมีความแข็งแรงไม่แตกต่างจากชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน ทั้งนี้เมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นพบว่าชิ้นงานที่มีรอยประสานยังคงมีความแข็งแรงที่ไม่แตกต่างกับชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมประเภทลดต้นทุนและไม่มีอันตรกิริยากับยาง จึงไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสาน นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณซิลิกาและเขม่าดำ ในช่วงปริมาณการบดผสม 15 และ 30 phr พบว่าความแข็งแรงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน อย่างไรก็ตาม

ก็ตามเมื่อปริมาณการบดผสมซิลิกาและเขม่าดำมากขึ้น ความแข็งแรงรอยประสานมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากการเกิดร่องบากรูปตัววี ซึ่งมีสาเหตุมาจากความหนืดและความแข็งแรงของยางที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ยางสามารถอัดตัว และไหลได้ยากขึ้น ดังนั้นบริเวณหน้าสัมผัสของรอยประสานจึงมีความหนาแน่นของเนื้อยางที่ต่ำ ซึ่งทำให้เกิดร่องบากรูปตัววี รวมถึงการเกิดโพรงอากาศขนาดเล็ก (Micro void) ภายในชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 44(ข) จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้ชิ้นงานมีพื้นที่ในการรับแรงลดลง และเกิดความเค้นสะสม (Stress concentration) นอกจากนี้ยางธรรมชาติที่มีการบดผสมสารตัวเติมในปริมาณที่สูง ทำให้ยางมีความแข็ง (Hardness) ที่เพิ่มขึ้น จึงมีความไวต่อความเสียหายที่เกิดจากร่องบากรูปตัววี (Notch sensitivity) สูงขึ้น (Chookeaw *et al.*, 2010a; Chookeaw *et al.*, 2010b; Tungkeunkunt *et al.*, 2010)

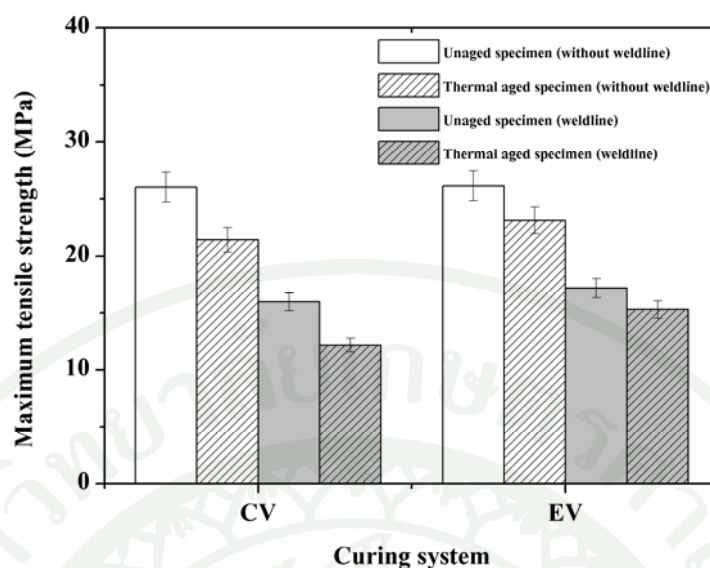


ภาพที่ 44 ภาพถ่ายตัดขวางของชิ้นงานยางธรรมชาติที่บริเวณรอยประสาน (ก) ไม่มีร่องบากรูปตัววี (ข) มีร่องบากรูปตัววี

3. อิทธิพลของระบบการคงรูปและการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

โดยทั่วไปแล้วค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยางธรรมชาติที่ผ่านการคงรูปด้วยระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (CV) มีค่ามากกว่ายางธรรมชาติที่ผ่านระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (EV) (Hofmann, 1988) เนื่องจากการเกิดพันธะเชื่อมขวางแบบพอลิซัลไฟดิก อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบในงานวิจัยนี้ พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านการคงรูปแบบ CV และ EV มีค่าไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 45 ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณเขม่าดำที่ใช้บดผสมในปริมาณ 60 phr ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงอย่างมากเมื่อเทียบกับ อิทธิพลจากรูปแบบการเชื่อมขวาง อย่างไรก็ตามหากพิจารณาเปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีและไม่มีรอยประสาน ซึ่งผ่านระบบการคงรูปแบบ CV และ EV พบว่าชิ้นงานที่มีรอยประสานมีความแข็งแรงต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน ทั้งนี้เนื่องจากเขม่าดำที่บดผสม ส่งผลให้ยางมีความหนืดที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้เกิดร่องบากรูปตัววี รวมไปถึงการเกิดโพรงอากาศขนาดเล็กบริเวณหน้าสัมผัสของรอยประสาน ดังที่ได้กล่าวมา

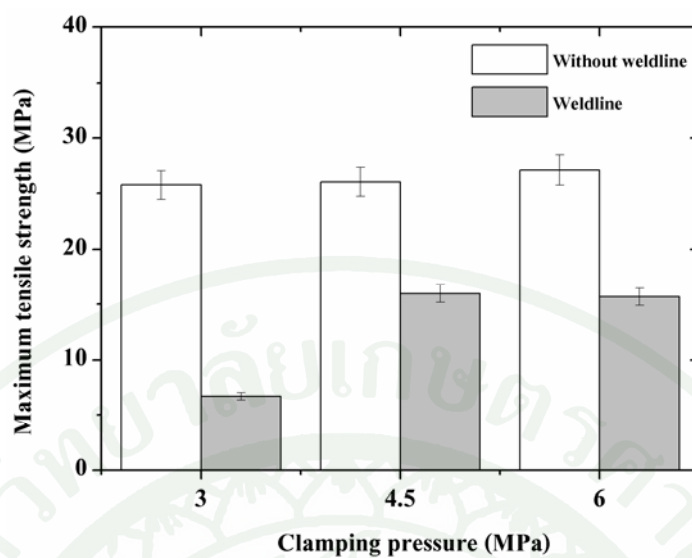
หากพิจารณาอิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานพบว่า ยางธรรมชาติที่ผ่านการคงรูปด้วยระบบ CV มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลงมากกว่ายางที่ผ่านการคงรูปด้วยระบบ EV ทั้งในกรณีที่ชิ้นงานมีและไม่มีรอยประสาน ทั้งนี้มีสาเหตุจากพันธะเชื่อมขวางของกำมะถันในระบบการคงรูปแบบ CV ซึ่งเป็นแบบพอลิซัลไฟดิก มีพลังงานในการสลายพันธะต่ำกว่าการเชื่อมขวางแบบโมโนซัลไฟดิกหรือไดซัลไฟดิกของระบบคงรูปแบบ EV รวมถึงการเสื่อมสภาพเนื่องจากพันธะคู่ภายในสายโซ่โมเลกุลยางธรรมชาติ ซึ่งทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนภายในตู้อบ จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ระบบการคงรูปแบบ CV มีความแข็งแรงลดลงมากกว่าระบบการคงรูปแบบ EV



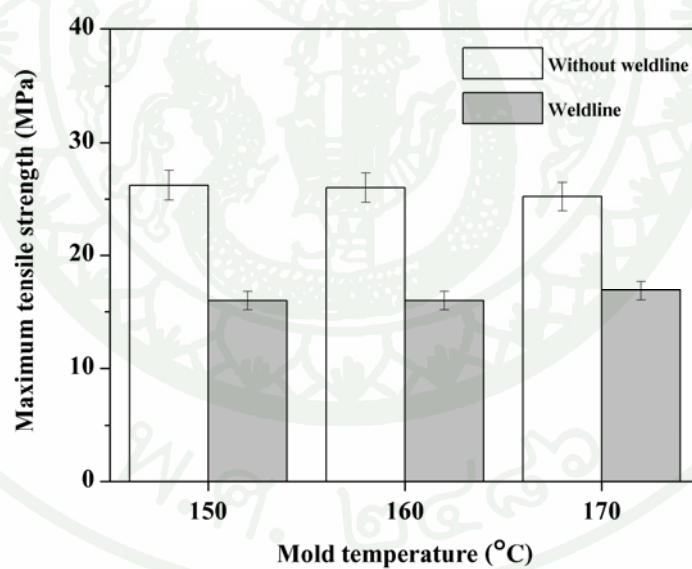
ภาพที่ 45 อิทธิพลของระบบการคงรูปและการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

4. อิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการอัดขึ้นรูปที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิและแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่มีต่อสมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่มีและไม่มีรอยประสาน เมื่อเติมเขม่าดำที่ 60 phr ดังแสดงในภาพที่ 46 และ 47 พบว่า ในกรณีของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่มีรอยประสาน การเพิ่มอุณหภูมิและแรงดันปิดแม่พิมพ์ไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด อย่างไรก็ตามในกรณีของชิ้นงานที่มีรอยประสานพบว่าแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่มีรอยประสานมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติการไหลของยางที่สามารถอัดตัวได้ (Compressible fluid) ส่งผลให้ที่บริเวณหน้าสัมผัสของรอยประสานมีความหนาแน่นของยางมากขึ้น รวมไปถึงขนาดของร่องบากรูปตัววีที่เล็กลง นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสาน ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นของยางคอมพาวด์ รวมถึงระยะทางการไหลของยางที่สั้น จึงทำให้ยางมีระยะเวลาในการไหลมาบรรจบกันเกิดเป็นรอยประสานที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางหรือการแพร่ข้ามของสายโซ่โมเลกุล จึงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ความแข็งแรงรอยประสานมีค่าไม่แตกต่างกัน



ภาพที่ 46 อิทธิพลของแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

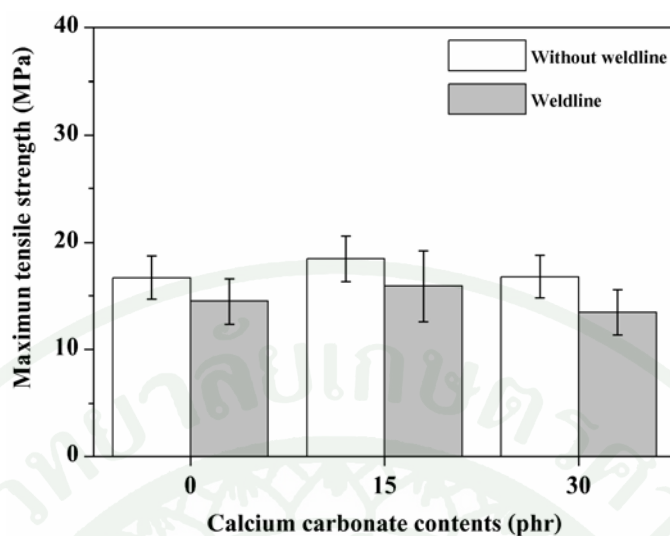


ภาพที่ 47 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

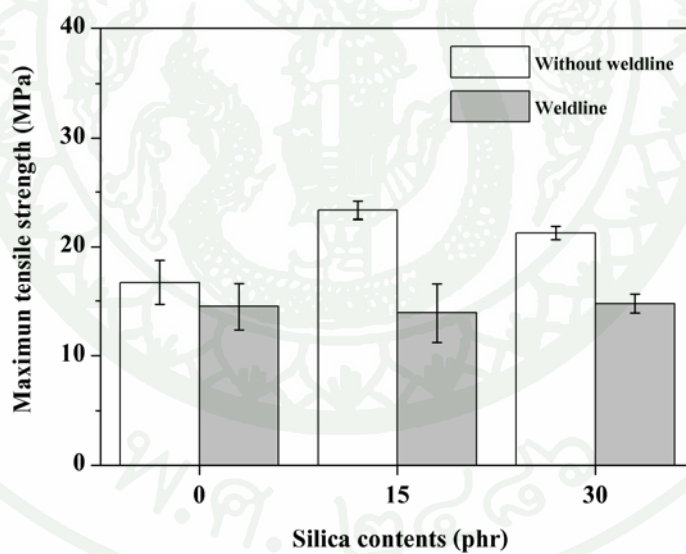
5. อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่ไม่มีและมียอยประสานแบบเย็นเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยางธรรมชาติที่ไม่มีรอยประสานดังแสดงในภาพที่ 48 ถึง 50 พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกับชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป กล่าวคือ ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ส่งผลต่อสมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุดเมื่อผสมเข้ากับยางธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนต มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และไม่มีอันตรกิริยากับเนื้อยาง ส่งผลให้ไม่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรง ในขณะที่การบดผสมซิลิกาและเขม่าดำทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากซิลิกาและเขม่าดำมีขนาดอนุภาคที่เล็ก จึงมีการกระจายตัวภายในเนื้อยางได้ดี รวมไปถึงมีอันตรกิริยากับเนื้อยางจากหมู่ฟังก์ชันที่ผิว

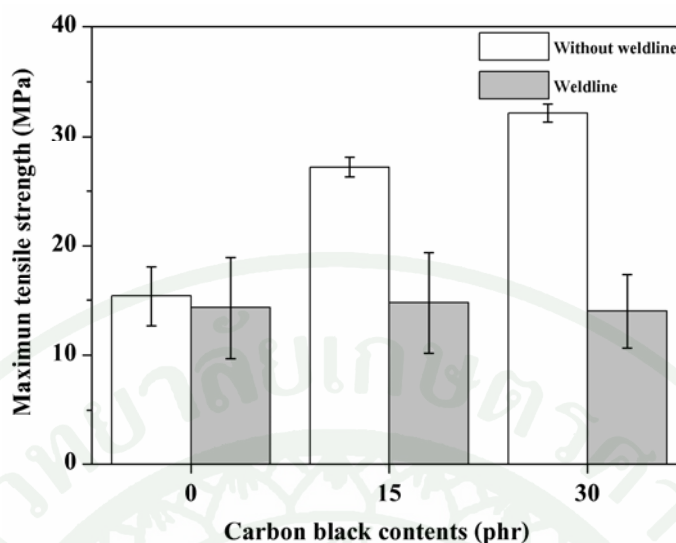
หากพิจารณาเปรียบเทียบความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่ไม่มีและมียอยประสานแบบเย็นเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป พบว่าในกรณีที่ไม่มีผสมสารตัวเติม ยางธรรมชาติที่มีรอยประสานมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการอัดขึ้นรูปที่มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 41 ถึง 43 ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากลักษณะการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน กล่าวคือ กระบวนการอัดขึ้นรูปอาศัยแรงดันฉีดจากสกรู เพื่อให้ยางสามารถไหลเข้าเบ้าแม่พิมพ์ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการให้ความร้อน รวมถึงความร้อนเนื่องจากการหมุนของสกรูภายในกระบอกฉีด เพื่อให้ยางมีความหนืดลดลงและสามารถไหลได้เต็มเบ้าพิมพ์ ในขณะที่กระบวนการอัดขึ้นรูปอาศัยแรงดันปิดแม่พิมพ์เพื่ออัดให้ยางไหลเต็มเบ้าแม่พิมพ์ ดังนั้นในกระบวนการอัดขึ้นรูป ความร้อนที่เกิดขึ้น จากในขั้นตอนของการเตรียมยางเพื่อฉีด และการไหลผ่านทางวิ่ง (Runner) และทางเข้า (Gate) ภายในแม่พิมพ์ฉีดซึ่งมีอุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C ซึ่งอาจทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางบางส่วน (Premature crosslink) โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณหน้าสัมผัสของรอยประสาน จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่มีผสมสารตัวเติมมีความแข็งแรงรอยประสานต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมที่บดผสมมากขึ้น พบว่าความแข็งแรงรอยประสานมีแนวโน้มที่ไม่เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 48 อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านในกระบวนการฉีดขึ้นรูป



ภาพที่ 49 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

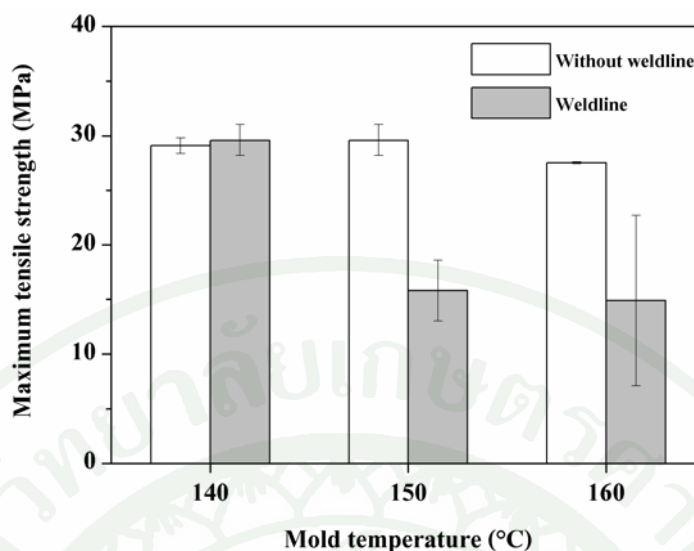


ภาพที่ 50 อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

6. อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ฉีดที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสาน

6.1 ยางธรรมชาติที่เกิดรอยประสานแบบเย็น (Cold weldline)

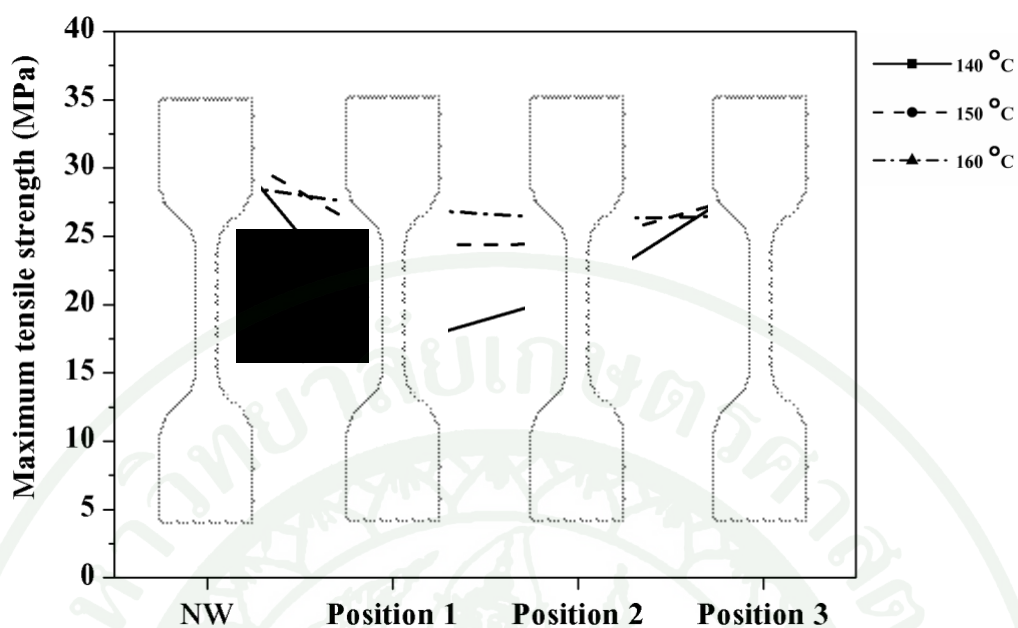
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ฉีดที่มีต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 30 ดังแสดงในภาพที่ 51 พบว่า ในกรณีของชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ไม่ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุด นอกจากนี้ในกรณีของอุณหภูมิแม่พิมพ์ 140 °C ชิ้นงานที่มีรอยประสานมีความแข็งแรงไม่แตกต่างกับชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน อย่างไรก็ตามอุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงรอยประสานมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ความหนืดของยางขณะไหลภายในแม่พิมพ์เพิ่มสูงขึ้น รวมไปถึงเวลาเริ่มคงรูปที่ลดลง ดังนั้นจึงทำให้เกิดการคงรูปบางส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณหน้าสัมผัสของรอยประสาน นอกจากนี้ความหนืดของยางที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ยางอัดตัวได้ยากขึ้น จึงส่งผลทำให้เกิดร่องบากรูปตัววี ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ชิ้นงานที่มีรอยประสานมีความแข็งแรงลดลง



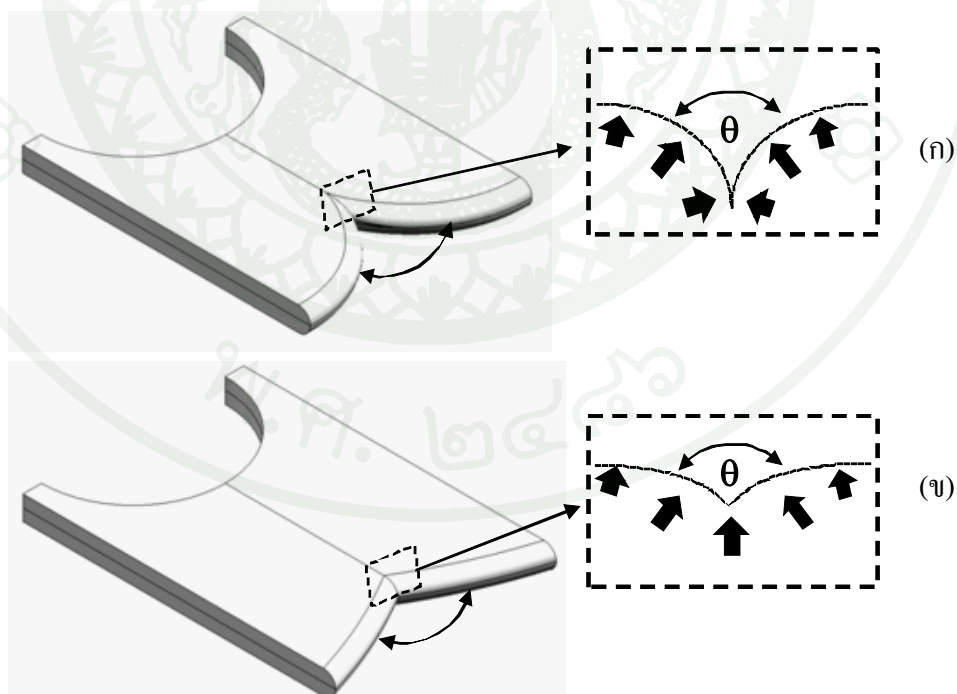
ภาพที่ 51 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่ไม่มีและมียรอยประสานแบบเย็นเมื่อผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

6.2 ยางธรรมชาติที่เกิดรอยประสานแบบร้อน (Hot weldline)

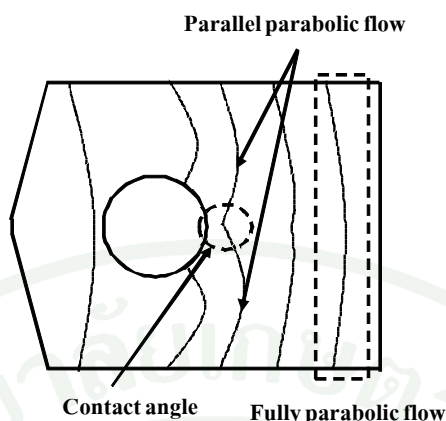
ภาพที่ 52 แสดงผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำ 30 phr เมื่อเกิดรอยประสานแบบร้อน ที่อุณหภูมิ 140 150 และ 160 °C ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานภายหลังจากอินเสิร์ต (Position 1) มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับตำแหน่งที่ไม่เกิดรอยประสาน (NW) โดยหากพิจารณาที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ฉีดเท่ากับ 140 °C พบว่าความแข็งแรงรอยประสานมีค่าต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ฉีด 150 และ 160 °C ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากยางที่มีความหนืดน้อยมีมุมปะทะ (Contact angle, θ) ภายหลังจากไหลผ่านอินเสิร์ตที่แคบกว่ายางที่มีความหนืดสูง ดังแสดงในภาพที่ 53(ก) และ 53 (ข) ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่ตั้งฉากกับทิศทางการรับแรงดึง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงระยะทางการไหลที่เพิ่มมากขึ้นพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการพัฒนารูปแบบการไหลจากพาราโบลาสู่เป็นพาราโบลาที่สมบูรณ์ ส่งผลให้การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลมีทิศทางตามแรงดึงมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 54 ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วในกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุเทอร์โมพลาสติก (พัชรพล และ นิพัทธ์, 2552)



ภาพที่ 52 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์และตำแหน่งของรอยประสานร้อนที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยางธรรมชาติ



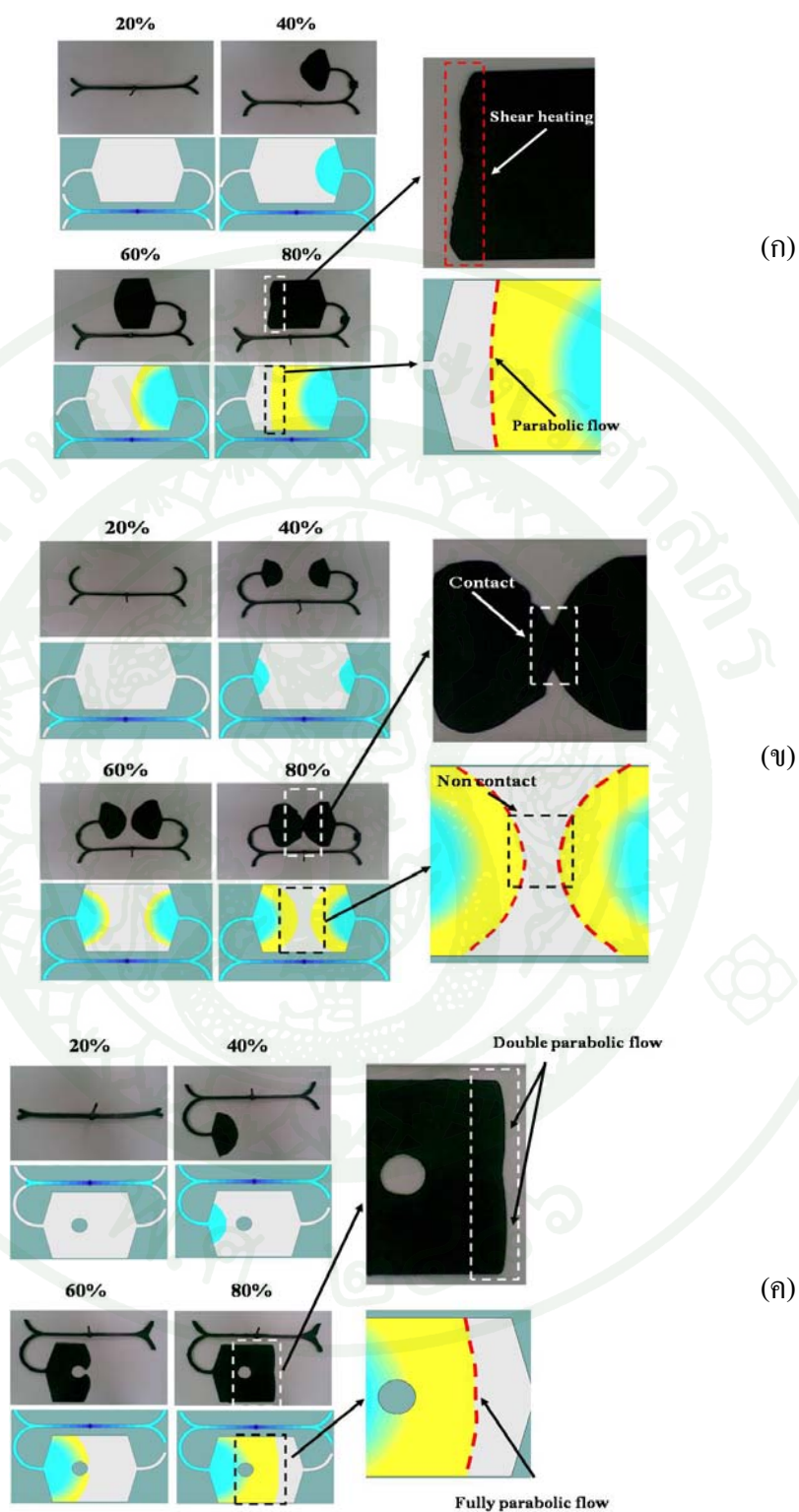
ภาพที่ 53 มุมปะทะ (θ) ของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายหลังจากไหลผ่านอินเลอร์ (ก) ยางที่มีความหนืดน้อย (ข) ยางที่มีความหนืดน้อย



ภาพที่ 54 การพัฒนารูปแบบการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวและยางภายหลังการไหลผ่านอินเลิร์ตภายในแม่พิมพ์

7. ผลวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม

จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมและผลที่ได้จากการทดสอบจริง พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน ในช่วงแรกของกระบวนการฉีด กล่าวคือ รูปร่างและระยะทางการไหลของยางภายในแม่พิมพ์จากโปรแกรมวิเคราะห์การไหลและกระบวนการฉีดจริง ที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามเมื่อระยะทางและเวลาในการไหลเพิ่มขึ้น ผลที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์การไหลเริ่มมีความแตกต่างจากกระบวนการฉีดจริง ยกตัวอย่างเช่น ภาพที่ 55(ก) แสดงการเกิดความร้อนเนื่องที่ผนัง ซึ่งส่งผลให้ยางหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวมีความหนืดที่ลดลง ทำให้ความเร็วในการไหลเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้โปรแกรมวิเคราะห์การไหลได้มีการกำหนดสมมุติฐานให้อุณหภูมิของยางหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าคงที่ตลอดระยะทางการไหล (Isothermal flow) จึงไม่คำนึงถึงความร้อนที่เกิดขึ้น ในขณะที่ภาพที่ 55(ข) พบว่าความเร็วในการไหลของยางที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์การไหลมีค่าที่ช้ากว่ากระบวนการฉีดจริง เนื่องจากในโปรแกรมวิเคราะห์การไหลได้มีการกำหนดค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient) ให้เป็นค่าคงที่ ซึ่งในความเป็นจริงค่าดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการขึ้นรูป นอกจากนี้ค่าที่ดังกล่าวยังได้จากการทดสอบของยางที่มีการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางแล้ว (Cured rubber) ซึ่งมีค่าที่สูงกว่ายางที่ยังไม่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (Uncured rubber) จากเหตุผลดังกล่าวในโปรแกรมวิเคราะห์การไหลจึงมีการถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์สู่เนื้อยางที่มากกว่าความเป็นจริง ส่งผลให้ยางมีความหนืดที่เพิ่มสูงขึ้น จึงมีความเร็วในการไหลที่ลดลง ทั้งนี้เมื่อ



ภาพที่ 55 ผลเปรียบเทียบการไหลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมและผลจากการฉีด
 จักรูปจริง (ก) ชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน (ข) ชิ้นงานที่มีรอยประสานแบบเย็น (ค)
 ชิ้นงานที่มีรอยประสานแบบร้อน

พิจารณาภาพที่ 55(ค) พบว่าการพัฒนารูปแบบการไหลหลังผ่านอินเสิร์ตของโปรแกรมวิเคราะห์การไหลมีแนวโน้มที่เร็วกว่าผลจากระบวนการคิดจริง ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดของยางในโปรแกรมวิเคราะห์การไหลมีค่าที่มากกว่ากระบวนการคิดจริง ดังนั้นจึงมีมุมปะทะที่กว้างกว่ากระบวนการคิดจริง ส่งผลให้มีการพัฒนารูปแบบการไหลได้สมบูรณ์โดยใช้ระยะทางที่สั้นกว่า นอกจากนี้ในกระบวนการคิดขึ้นรูปจริงยังพบการเคลื่อนตัวที่ผนัง (Malkin *et al.*, 1993) ซึ่งทำให้รูปร่างการไหลภายในแม่พิมพ์ที่เปลี่ยนไป ในขณะที่โปรแกรมวิเคราะห์การไหลกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนตัวที่ผนัง จากสาเหตุดังที่ได้กล่าวมา จึงทำให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมยังคงมีความแตกต่างจากกระบวนการคิดขึ้นรูปจริง

8. ผลการประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทเทียมในการทำนายตำแหน่งของรอยประสานในกระบวนการอัดขึ้นรูป

8.1 การวิเคราะห์เพื่อหาสถาปัตยกรรมเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

ผลการเลือกสถาปัตยกรรมของเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม จากตารางที่ 4 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของสถาปัตยกรรมทั้ง 3 แบบ โดยพบว่าสถาปัตยกรรมแบบ Generalized feed forward ให้ความแม่นยำมากกว่าแบบอื่น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้เพื่อพัฒนาโครงสร้างตัวอื่นของสถาปัตยกรรม

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์เพื่อหาสถาปัตยกรรมเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

สถาปัตยกรรม	จำนวน ชั้นซ่อน	จำนวนนิวรอน ชั้นซ่อน	จำนวนรอบ การสอน	อัตราการเรียนรู้	ค่าความคลาดเคลื่อน กำลังสองเฉลี่ย
1. Multilayer perception	1	22	1000	0.01	0.0481
2. Generalized feed forward	1	22	1000	0.01	0.0473
3. Recurrent network	1	22	1000	0.01	0.0520

8.2 ผลการวิเคราะห์เพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการสอนที่เหมาะสมในการสอนเครือข่ายประสาทเทียม

จากผลการวิเคราะห์เพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการฝึกหัดที่เหมาะสมในการสอนเครือข่ายประสาทเทียม ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าจำนวนรอบการสอนที่ 20,000 รอบ และอัตราการเรียนรู้ที่ 0.09 ให้ค่าที่เหมาะสมในการทำนายตำแหน่งของรอยประสาน

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์เพื่อหาอัตราการเรียนรู้และจำนวนรอบการสอนที่เหมาะสมในการสอนเครือข่ายประสาทเทียม

สถาปัตยกรรม	จำนวน ชั้นซ่อน	จำนวนนิวรอน ชั้นซ่อน	จำนวนรอบ การสอน	อัตราการเรียนรู้	ค่าความคลาดเคลื่อน กำลังสองเฉลี่ย
Generalized feed forward	1	22	1000	0.01	0.0471
				0.05	0.0353
				0.09	0.0286
				0.15	0.0248
Generalized feed forward	1	22	2000	0.01	0.0448
				0.05	0.0279
				0.09	0.0239
				0.15	0.0222
Generalized feed forward	1	22	3000	0.01	0.0409
				0.05	0.0251
				0.09	0.0224
				0.15	0.0213
Generalized feed forward	1	22	4000	0.01	0.0374
				0.05	0.0234
				0.09	0.0216
				0.15	0.0204

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สถาปัตยกรรม	จำนวน ชั้นซ่อน	จำนวนนิวรอน ชั้นซ่อน	จำนวนรอบ การสอน	อัตราการเรียนรู้	ค่าความคลาดเคลื่อน กำลังสองเฉลี่ย
Generalized feed forward	1	22	5000	0.01	0.0354
				0.05	0.0248
				0.09	0.0212
				0.15	0.0819
Generalized feed forward	1	22	10000	0.01	0.0276
				0.05	0.0234
				0.09	0.0200
				0.15	0.0844
Generalized feed forward	1	22	5000	0.01	0.0354
				0.05	0.0248
				0.09	0.0212
				0.15	0.0819

8.3 ผลการวิเคราะห์เพื่อหาจำนวนชั้นซ่อนที่เหมาะสม

จากผลการวิเคราะห์หาจำนวนชั้นซ่อนที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่าเมื่อจำนวนชั้นซ่อนเพิ่มสูงขึ้น ความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียมมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์เพื่อหาจำนวนชั้นซ่อนที่เหมาะสม

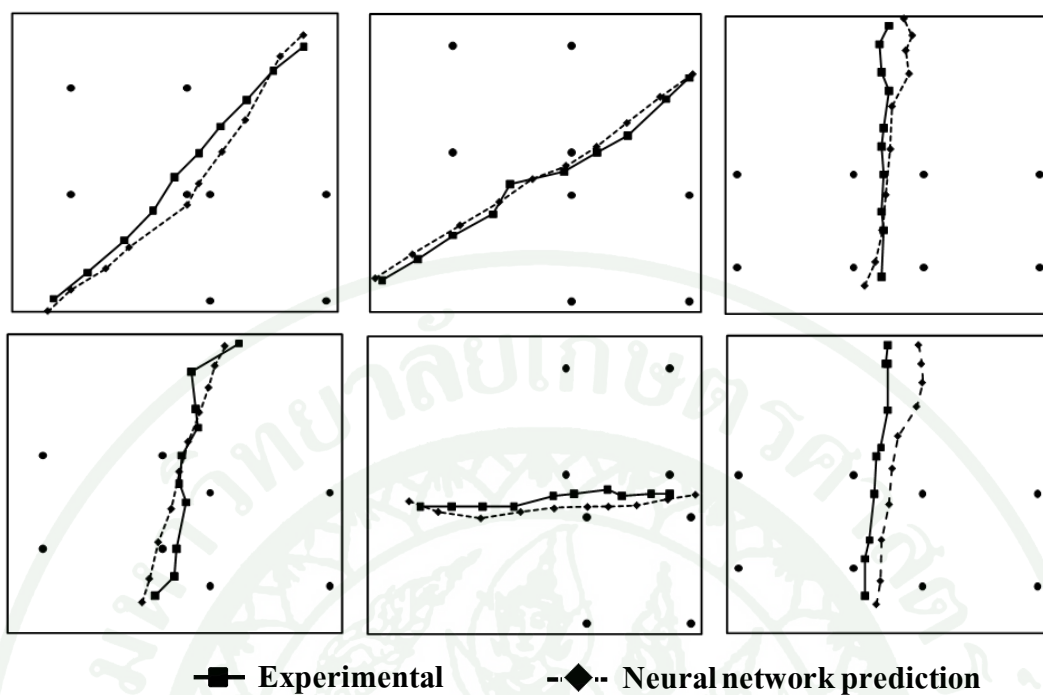
สถาปัตยกรรม	จำนวน ชั้นซ่อน	จำนวนนิวรอน ชั้นซ่อน	จำนวนรอบ การสอน	อัตราการเรียนรู้	ค่าความคลาดเคลื่อน กำลังสองเฉลี่ย
Generalized	1	22	1000	0.01	0.0458
feed forward	2	22	1000	0.01	0.0478
	3	22	1000	0.01	0.0477

8.4 จากผลการวิเคราะห์หาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม พบว่าจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเท่ากับ 37 ให้ความแม่นยำของเครือข่ายประสาทเทียมมากกว่าจำนวนอื่น ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์หาจำนวนนิวรอนที่เหมาะสม

สถาปัตยกรรม	จำนวน ชั้นซ่อน	จำนวนนิวรอน ชั้นซ่อน	จำนวนรอบ การสอน	อัตราการเรียนรู้	ค่าความคลาดเคลื่อน กำลังสองเฉลี่ย
Generalized feed forward	1	22	1000	0.01	0.04698
		25			0.04678
		28			0.04800
		31			0.04752
		34			0.04574
		37			0.04770
		40			0.04675
		43			0.04741
		46			0.04761
		49			0.04693

จากผลการทดลองที่ 1 ถึง 4 เพื่อหาโครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม พบว่าสถาปัตยกรรมแบบ Generalized feed forward ที่มีชั้นซ่อน 1 จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน 34 และชั้นผล 20 (24-34-20) ให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำมากที่สุด โดยผลทดสอบการใช้งานเครือข่ายประสาทเทียม แสดงดังภาพที่ 56 ทั้งนี้ผลที่ได้พบว่า การทำนายจากเครือข่ายประสาทเทียมยังมีผลที่แตกต่างจากกระบวนการอัดขึ้นรูปจริง ทั้งนี้เนื่องมาจากตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งได้แก่ ขอบเขตของแม่พิมพ์ ขอบเขตของชิ้นงานเริ่มต้น และตำแหน่งของรอยประสาน มีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนมาก ซึ่งทำให้จำนวนรูปแบบการสอนที่นำมาใช้ ไม่เพียงพอต่อการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ตำแหน่งของรอยประสานด้วยเครือข่ายประสาทเทียม ยังคงมีข้อดีในด้านความเร็วในการวิเคราะห์ เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสมแล้ว ซึ่งแตกต่างจากการใช้โปรแกรมจำลองการไหลภายในแม่พิมพ์ในหัวข้อ 4.7 ที่ต้องใช้เวลาในการคำนวณที่มากกว่า



ภาพที่ 56 ผลทดสอบการใช้งานเครือข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานในยางธรรมชาติโดยใช้แม่พิมพ์ฉีดและแม่พิมพ์อัด ที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น ปัจจัยที่ได้ทำการศึกษาสามารถแบ่งออกเป็น ปัจจัยจากชนิดและปริมาณสารตัวเติม ซึ่งได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา และเขม่าดำ ปัจจัยจากระบบการคงรูป ได้แก่ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิมและระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาปัจจัยจากระบวนการขึ้นรูป ได้แก่ อุณหภูมิและแรงดันในการปิดแม่พิมพ์ รวมถึงการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมในการทำนายตำแหน่งของรอยประสานที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ผลที่ได้จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในกรณีของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมพบว่า ชิ้นงานที่มีรอยประสานซึ่งผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป มีความแข็งแรงไม่แตกต่างกับชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมมีค่าความหนืดต่ำจึงสามารถไหลและอัดตัวภายในแม่พิมพ์ได้ดี จึงทำให้บริเวณหน้าสัมผัสของรอยประสานมีความหนาแน่นของเนื้ออย่างมาก ส่งผลให้ไม่เกิดร่องบากรูปตัววี ในขณะที่ความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีรอยประสานหลังผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป มีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการอัดขึ้นรูปที่มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีความร้อนเฉือน (Shear heating) ที่เกิดขึ้นจากการหมุนของสกรูในกระบอกฉีด หรือการที่ยางไหลผ่านทางวิ่งและทางเข้า รวมถึงระยะทางการไหลภายในแม่พิมพ์ที่มากกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป จึงทำให้ยางเริ่มมีการคงรูปบางส่วน ส่งผลให้ชิ้นงานที่มีรอยประสานมีความแข็งแรงต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน

2. จากผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อความแข็งแรงยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสาน เมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป พบว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงทั้งในชิ้นงานที่มีและไม่มีรอยประสาน ในขณะที่การบดผสมซิลิกาและเขม่าดำที่ปริมาณการบดผสม 15 และ 30 phr พบว่าทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีและไม่มีรอยประสานเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ปริมาณบดผสมเพิ่มเป็น 45 และ 60 phr พบว่าความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีรอยประสานลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้

เกิดร่องบากรูปตัววี และโพรงอากาศขนาดเล็กที่บริเวณหน้าสัมผัสของรอยประสาน ทั้งนี้เมื่อยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป พบว่าในกรณีชิ้นงานที่ไม่มีรอยประสาน การบดผสมสารตัวเติมให้ผลที่คล้ายคลึงกับกระบวนการอัดขึ้นรูป ในขณะที่ยางธรรมชาติที่มีรอยประสานพบว่า ปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยประสาน

3. เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลจากระบบการคงรูปที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสาน พบว่ายางธรรมชาติที่ผ่านระบบการคงรูปแบบดั้งเดิมมีความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีและไม่มีรอยประสาน ไม่แตกต่างจากระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ เนื่องอิทธิพลของเขม่าดำที่บดผสม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนพบว่า ยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานที่ผ่านการคงรูปด้วยระบบดั้งเดิม มีค่าที่ต่ำกว่าระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องจากระบบการเชื่อมขวางของกัมมะถัน แบบโพลีซัลไฟดิกในระบบการคงรูปแบบดั้งเดิมซึ่งมีความแข็งแรงของพันธะที่ต่ำกว่า การเชื่อมขวางแบบโมโนหรือไดซัลไฟดิกในระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ

4. จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและแรงดันปิดแม่พิมพ์ในกระบวนการอัดขึ้นรูป พบว่า การเพิ่มแรงดันปิดแม่พิมพ์ทำให้ความแข็งแรงของรอยประสานเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มแรงดันปิดแม่พิมพ์ทำให้บริเวณหน้าสัมผัสของรอยประสานมีความหนาแน่นของยางเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ร่องบากรูปตัววีมีขนาดเล็กลง ในขณะที่อุณหภูมิแม่พิมพ์อัดไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยประสาน อย่างไรก็ตามในกรณีของชิ้นงานรอยประสานแบบเย็นที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยประสานลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดของยางที่เพิ่มสูงขึ้นรวมถึงเวลาเริ่มคงรูปที่ต่ำลง จึงทำให้บริเวณหน้าสัมผัสของรอยประสานมีร่องบากรูปตัววีที่ขนาดใหญ่ขึ้น รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาของรูปบางส่วนเนื่องจากเวลาเริ่มคงรูปที่สั้นลง อย่างไรก็ตามในกรณีของการเกิดรอยประสานร้อนพบว่าพบว่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานหลังจากอินเอร์ตมีในตำแหน่งที่หนึ่ง มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับตำแหน่งที่ไม่เกิดรอยประสาน เนื่องจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่ตั้งฉากกับการรับแรงดึง ทั้งนี้เมื่อระยะทางการไหลเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการพัฒนารูปแบบการไหลจากพาราโบลาสู่หลังผ่านอินเอร์ตเป็นพาราโบลาที่สมบูรณ์ จึงทำให้การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลมีทิศทางตามแรงดึงมากขึ้น

5. จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบรูปแบบการไหลภายในแม่พิมพ์ระหว่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมและกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริง พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดสอบจริง อย่างไรก็ตามยังคงมีความต่างของรูปแบบการไหลและตำแหน่งของรอยประสาน ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากสมมุติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ ที่แตกต่างจากความเป็นจริง ซึ่งได้แก่ การกำหนดให้อุณหภูมิยางหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางในการไหล (Isothermal flow) การกำหนดให้การไหลภายในแม่พิมพ์ไม่เกิดการเลื่อนตัว (Wall slip) และ กำหนดให้ค่าการนำความร้อนและการถ่ายเทความร้อนเป็นค่าคงที่

6. จากผลการประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทเทียมในการทำนายตำแหน่งของรอยประสานของกระบวนการอัดขึ้นรูป ผลที่ได้พบตำแหน่งของรอยประสานที่ได้จากเครือข่ายประสาทเทียม ยังคงมีความแตกต่าง ทั้งนี้เนื่องมาจากการความซับซ้อนของตำแหน่งรอยประสานที่มีหลายตัวแปรเกี่ยวข้อง เช่น ขอบเขตของแม่พิมพ์ ตำแหน่งของยางคอมพาวนด์ จึงจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจำนวนมากเพื่อใช้ในการสอนเครือข่ายประสาทเทียม เพื่อให้สามารถทำนายได้อย่างแม่นยำ

ข้อเสนอแนะ

พัฒนาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายความแข็งแรงรอยประสาน โดยมีตัวแปรที่ครอบคลุมถึงชนิดและปริมาณสารตัวเติม รวมไปถึงปัจจัยในกระบวนการผลิต

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

พงษ์ธร แซ่อูย. 2550. สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), ปทุมธานี.

พัชรพล พุ่มขจร และ นิพัทธ์ แพเจริญชัย. 2552. อิทธิพลของความหนาและตำแหน่งบนรอยเชื่อมประสานที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต ที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป. ปรินญาณิพนธ์ปริญาตริ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วรารณ ขจรไชยกูล. 2552. ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), กรุงเทพฯ.

Abu-Zahra, N. H. 2003. Neural Network Approach to Density Control of Rigid PVC Foam in Extrusion Process. **International Polymer Processing**. 18(2): 122-126.

Akay, M., S. Ozden and T. Tansey. 1996. Prediction of Process-induced Warpage in Injection Molded Thermoplastics. **Polymer Engineering and Science** 36(13): 1839-1846.

Barlow, F.W. 1993. **Rubber Compounding: Principles, Materials and Techniques**. Marcel Dekker, New York.

Beaumont, J.P. 2004. **Runner and Gating Design Handbook**. Hanser Publisher, Munich.

Chan, B.L., D.J. Elliott, N. Holley and J.F. Smith. 1974. The Influence of Curing Systems on The Properties of Natural Rubber. **Polymer Science**. 48(1): 61-86.

Ching, P.C., M.T. Chuang, Y.H. Hsiao, Y.K. Yang and C.H. Tsai. 2009. Simulation and Experimental Study in Determining Injection Molding Process Parameters for Thin-Shell Plastic Parts via Design of Experiments Analysis. **Expert Systems with Applications**. 36(7): 10752-10759.

- Chookaew, W., S. Rodkwan and N. Ranong. 2007. A Prediction on Rubber Product Shrinkage in Compression Molding using Neural Network. *In The 9th Asian Symposium on Visualization*, Hong Kong.
- Chookaew, W., T. Tungkeunkunt, J. Mingbunjerdasuk, N. Na-Ranong and S. Patcharaphun.. 2010a. Weldline Strength of Acrylonitrile Butadiene Rubber Processed by Compression Molding Technique. *In The International Conference on Materials Processing Technology*, Thailand.
- Chookaew, W., T. Tungkeunkunt, N. Na-Ranong and S. Patcharaphun.. 2010b. Effect of Processing Parameters on the Weld line Strength of Compression Molded Natural Rubber. *In The 12th International Seminar on Elastomers*, Thailand.
- Chookaew, W., R. Sudto, T. Tungkeunkunt and S. Patcharaphun. 2010c. Effect of Curing system and Carbon black Content on Temperature Profiles During Rubber Compression Molding Process. *In The 6th Materials Science and Technology Conference*, Thailand.
- Ciesielski, A. 1999. **An Introduction to Rubber Technology**. Rapra Technology, Shawbury.
- Demirhan, E., F. Kandemirli, M. Kandemirli and V. Kovalishyn. 2007. Investigation of the Physical and Rheological Properties of SBR-1712 Rubber Compounds by Neural Network Approaches. **Materials and Design**. 28(5): 1737-1741.
- Deng, Y.-M., D. Zheng, B.-S. Sun and H.-D. Zhong. 2008. Injection Molding Optimization for Minimizing the Defects of Weld Lines. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**. 47(9): 943-952.
- Fakhru'l-Razi, A., M.A. Atieh, N. Girun, T.G. Chuah, M.E. Sadig and D.R.A. Biak. 2006. Effect of Multi-Wall Carbon Nanotubes on the Mechanical Properties of Natural Rubber. **Composite Structure**. 75(4): 496-500.

- Fellahi, S., A. Meddad, B. Fisa and B.D. Favis. 1995. Weldlines in Injection-Molded Part: A Review. **Advance in Polymer Technology**. 14(3): 169-195.
- Fuller, K.N.G. and W.S. Fulton. 1990. The Influence of Molecular Weight Distribution and Branching on The Relaxation Behaviour of Uncrosslinked Natural Rubber. **Polymer**. 31(4): 609-615.
- Funt, J.F. 2009. **Mixing of Rubber**. Rapra Technology, Shawbury.
- Gupta, M.M., L. Jin and N. Homma. 2003. **Static and Dynamic Neural Networks: From Fundamentals to Advanced Theory**. John Wiley and Sons, New Jersey.
- Hagan, M.T., H.B. Demuth and M. Brale. 1995. **Neural Network Design**. PWS Publishing, Boston.
- Hewitt, N. 2007. **Compounding Precipitated Silica in Elastomers**. William Andrew, New York.
- Hoffman, W. 1989. **Rubber Technology Handbook**. Hanser Publisher, Munich.
- Isayev, A.I. 1991. **Modeling of Polymer Processing**. Hanser Publisher, Munich.
- Ismail, H. and R.M. Jaffri. 1999. Physico-Mechanical Properties of Oil Palm Wood Flour Filled Natural Rubber Composites. **Polymer Testing**. 18(5): 381-388.
- Ismail, H., N. Rosnah and H.D. Rozman. 1997. Curing Characteristics and Mechanical Properties of Short Oil Palm Fibre Reinforced Rubber Composites **Polymer**. 38(16): 4059-4064.

- Jones, P. 2008. **The Mould Design Guide**. Rapra Technology, Shawbury.
- Kantala, C., E. Wimolmala, C. Sirisinha and N. Sombatsompop. 2009. Reinforcement of Compatibilized NR/NBR Blends by Fly Ash Particles and Precipitated Silica. **Polymers for Advance Technologies**. 20(5): 448-458.
- Karragac, B. M. L. and V. Deniz. 2009. Artificial Neural Network Approach for Predicting Optimum Cure Time of Rubber Compounds. **Materials and Design**. 30(5): 1685-1690.
- Kenig, A., A.B. David, M. Omer and A. Sadeh. 2001. Control of Properties in Injection Molding by Neural Networks. **Artificial Intelligence**. 14(6): 819-823.
- Kim, S.-G. and N.P. Suh. 1986. Performance Prediction of Weldline Structure in Amorphous Polymers. **Polymer Engineering and Science**. 26(17): 1200-1207.
- Kima, H.S., J.S. Son and Y.T. Imc. 2003. Gate Location Design in Injection Molding of an Automobile Junction Box with Integral Hinges. **Journal of Materials Processing Technology**. 140(1): 110–115.
- Kühnert , I., V. Stoll and G. Mennig. 2005 Sequential Injection Molding: The Influence on Weldlines. *In The 21st annual meeting of the polymer processing society (PPS), Germany*
- Leblanc, J.L. 2002. Rubber-filler Interactions and Rheological Properties in Filled Compounds. **Progress in Polymer Science**. 27(4): 627-687.
- Liu, S.-J., J.-Y. Wu and J.-H. Chang. 2001. Design of Experiments to Optimize the Weldline Strength in Injection Molded Thermoplastics. *In The Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers, United States.*

- Ludwig, H.-C., G. Fischer and H. Becker. 1995. A Quantitative Comparison of Morphology and Fiber Orientation in Push-Pull Processed and Conventional Injection Molded Parts. **Composites Science and Technology**. 53(2): 235-239.
- Malkin, A.Y., A.V. Baranov and M.E. Vickulenkova. 1993. Experimental Estimation of Wall Slip for Filled Rubber Compounds. **Rheological Acta**. 32(2): 150-155.
- Malguarnera, S.C. 1982. Weld Lines in Polymer Processing. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**. 18(1): 1-45.
- Morelli, C.L., J.A. Sousa. and A.S. Pouzada. 2007. Assessment of Weld Line Performance of PP/Talc Moldings Produced in Hot Runner Injection Molds. **Journal of Vinyl and Additive Technology**. 13(3): 159-165.
- Nah, C., J.Y. Lim, B. Hwan, C.K. Hong, A.N. Gent. 2010. Reinforcing Rubber with Carbon Nanotubes. **Applied Polymer Science**. 118(3): 1574-1581.
- Nguyen-Chung, T. 2004. Flow Analysis of the Weld Line Formation During Injection Mold Filling of Thermoplastics. **Rheologica Acta**. 43(3): 240-245.
- Nie, Y., L. Qu, G. Huang, B. Wang, G. Weng and J. Wu. 2010. Improved Resistance to Crack Growth of Natural Rubber by The Inclusion of Nanoclay. **Polymers for Advanced Technologies**. n.d.
- Osswald, T.A., L.S. Turng and J. Gramann. 2008. **Injection Molding Handbook**. Hanser Publisher, Munich.

- Padmavathi, G., M.G. Mandan, S.P. Mitra and K.K. Chaudhuri. 2005 . Neural Modelling of Mooney Viscosity of Polybutadiene Rubber. **Computers and Chemical Engineering**. 29(7): 1677-1685.
- Patcharaphun, S., B. Zhang and G. Mennig. 2006. Investigation on Weldline Strength of Short-glass-fiber Reinforced Polycarbonate Manufactured through Push–Pull Processing Technique. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. 25(4): 421-435.
- Qu, L., G. Huang, P. Zhang, Y. Nie, G. Weng and J. Wu. 2010. Synergistic Reinforcement of Nanoclay and Carbon Black in Natural Rubber. **Polymer International**. 59(10): 1397-1402.
- Rattanasom, N., T. Saowapark and C. Deeprasertkul. 2007. Reinforcement of Natural Rubber with Silica/Carbon Black Hybrid Filler. **Polymer Testing**. 26(3): 369-377.
- Rauwendall, C. 1986. **Polymer Extrusion**. Hanser Publisher, Munich.
- Rawson, K.W., P.S. Allan and M.J. Bevis. 1999. Controlled Orientation of Reflective Pigment and Optical Property Characterization of Injection-Molded Polypropylene. **Polymer Engineering and Science**. 39(1): 177-189.
- Reis, R.L., A.M. Cunha and M.J. Bevis. 1998. Shear Controlled Orientation Injection Molding of Polymeric Composites with Enhanced Properties. *In* **Society of Plastics Engineers Annual Technical Conference**, United States
- Rodgers, B. and W. Waddell. 2005. **Science and Technology of Rubber**. Academic press, London.
- Sadeghi, B.H.M. 2000. A BP-Neural Network Predictor Model for Plastic Injection Molding Process **Journal of Materials Processing Technology**. 103(3): 411-416.

- Seadan, M., P. Pongbhai, P. Thairaj and T. Watanakamtornkul. 2002. Weld-line Strength of Rubber in Injection Molding: Effect of Injection Factors and Compound Characteristics. **Rubber Chemistry and Technology**. 75(1): 83-92.
- Selden, S. 1997. Effect of Processing on Weld Line Strength in Five Thermoplastics. **Polymer Engineering and Science**. 37(1): 205-218.
- Shoemaker, J. 2008. **Moldflow Design Guide: A Resource for Plastics Engineers**. Hanser Publishers, Munich.
- Shokri, P. and N. Bhatnagar. 2007. Effect of Packing Pressure on Fiber Orientation in Injection Molding of Fiber-Reinforced Thermoplastics. **Polymer Composites**. 28(2): 214-223.
- Soltani, F. and S. Manoochehri. 1999. A Neural Network-Based Prediction of the Weld Lines in Resin Transfer Molded Parts. *In American Society of Mechanical Engineers Technical Conference*, United states.
- Tungkeunkunt, T., W. Chookaew and S. Patcharaphun. 2010. An Investigation of Weldline Strength in Natural Rubber Blends. *In 1st Polymer Conference of Thailand*, Thailand.
- Turng, L.S. and H. Kharbas. 2004. Effect of Process Conditions on the Weld-Line Strength And Microstructure Of Microcellular Injection Molded Parts. **Polymer Engineering and Science**. 43(1): 157-168.
- Wu, C.H. and W.J. Liang. 2005. Effects of Geometry and Injection-Molding Parameters on Weld-line Strength. **Polymer Engineering and Science**. 45(7): 1021-1030.

- Wu, C.-Y., C.-C. Ku and H.-Y. Pai. 2011. Injection Molding Optimization with Weld Line Design Constraint using Distributed Multi-Population Genetic Algorithm. **International Advance Manufacturing Technology**. 52(1-4): 131-141.
- Yeung, V.W.S. and K.H. Lau. 1997 . Injection Moulding C-MOLD CAE Package Process Parameter Design and Quality Function Deployment: A Case Study of Intelligent Materials Processing. **Journal of Materials Processing Technology**. 63(1-4): 481-487.
- Yung, K.S, C.W. Wu, Y.F. Yu and H.W Chung. 2008. Analysis for Optimal Gate Design of Thin-Walled Injection Molding. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. 35(6): 728-734.
- Zhai, M., Y.C. Lam and C.K. Au. 2006. Runner Sizing and Weld Line Positioning for Plastics Injection. **Engineering with Computers**. 21(3):218-224.
- Zhou, H. and D. Li. 2005. Computer Evaluation of Weld Lines in Injection-molded Parts . **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. 24(3): 315-322.





ตารางผนวกที่ ก1 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหลและสมบัติการคงรูปเมื่อบดผสมเข้ากับยางธรรมชาติ

Filler contents (phr)	Mooney viscosity		
	Calcium carbonate	Silica	Carbon black
0	36.50	36.50	36.50
15	40.00	46.32	44.57
30	47.80	64.40	47.81
45	51.80	119.50	79.10
60	58.70	122.80	95.60

ตารางผนวกที่ ก2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการคงรูปเมื่อบดผสมเข้ากับยางธรรมชาติ

Filler contents (phr)	Cure time (min)			Scorch time (min)		
	Calcium carbonate	Silica	Carbon black	Calcium carbonate	Silica	Carbon black
0	7.26	7.26	7.26	4.48	4.48	4.48
15	7.26	6.04	4.59	4.41	2.57	2.04
30	5.00	7.07	4.37	2.40	2.41	1.39
45	5.34	8.53	4.44	3.03	0.45	1.14
60	5.08	11.27	4.38	2.37	0.09	1.25

ตารางผนวกที่ ก3 อิทธิพลของระบบการคงรูปต่อสมบัติการคงรูปเมื่อบดผสมเข้ากับยางธรรมชาติ

Curing system	Test temperature (°C)	Scorch time (min)	Cure time (min)	Torque _{min} (M _L) (dN.m)	Torque _{max} (M _H) (dN.m)	Torque difference (Δm) (dN.m)
CV	150	2.12	8	2.64	15.63	12.99
	160	1.17	4.18	2.39	14.57	12.18
	170	0.48	2.39	2.39	14.37	11.98
EV	150	1.51	5.15	2.47	14.43	11.96
	160	1.04	2.35	2.31	13.81	11.5
	170	0.42	1.28	2.23	13.23	11



ภาคผนวก ข

ผลทดสอบความแข็งแรงของรอยประสานโดยกระบวนการอัดขึ้นรูป

ตารางผนวกที่ ข1 อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

Filler contents (phr)	Tensile strength (MPa)	S.D.	Weldline strength (MPa)	S.D.
0	22.27	1.11	22.36	1.12
15	25.20	1.26	24.2	1.21
30	23.32	1.17	21.72	1.09
45	24.25	1.21	21.68	1.08
60	21.20	1.06	20.13	1.00

ตารางผนวกที่ ข2 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

Filler contents (phr)	Tensile strength (MPa)	S.D.	Weldline strength (MPa)	S.D.
0	22.27	1.11	22.36	1.12
15	21.25	1.06	22.08	1.10
30	24.70	1.24	23.54	1.18
45	21.28	1.06	6.02	0.30
60	17.26	0.86	8.67	0.43

ตารางผนวกที่ ข3 อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

Filler content (phr)s	Tensile strength (MPa)	S.D.	Weldline strength (MPa)	S.D.
0	22.27	1.11	22.36	1.12
15	28.36	1.42	27.63	1.38
30	28.76	1.44	28.08	1.40
45	27.08	1.35	20.775	1.04
60	26.00	1.30	15.97	0.80

ตารางผนวกที่ ข4 อิทธิพลของระบบการคงรูปและการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

Curing system	Tensile strength (Mpa)				Weldline strength (Mpa)			
	Before	S.D.	After	S.D.	Before	S.D.	After	S.D.
	aging		aging		aging		aging	
CV	26.00	1.3	21.42	1.07	15.97	0.79	12.17	0.61
EV	26.13	1.3	23.12	1.15	17.20	0.86	15.30	0.77

ตารางผนวกที่ ข5 อิทธิพลของแรงดันปิดแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

Clamping pressure (MPa)	Tensile strength (MPa)	S.D.	Weldline strength (MPa)	S.D.
3	25.73	1.29	6.70	0.33
4.5	26.00	1.30	15.97	0.80
6	27.07	1.35	15.70	0.78

ตารางผนวกที่ ข6 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป

Mold temperature (°C)	Tensile strength (MPa)	S.D.	Weldline strength (MPa)	S.D.
150	26.20	1.31	15.97	0.80
160	26.00	1.30	15.97	0.80
170	25.20	1.26	16.87	0.84



ตารางผนวกที่ ค1 อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

Filler contents (phr)	Tensile strength (MPa)	S.D.	Weldline strength (MPa)	S.D.
0	16.71	2.04	14.48	2.15
15	18.5	2.12	15.90	3.32
30	16.8	2.02	13.44	2.12

ตารางผนวกที่ ค2 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

Filler contents (phr)	Tensile strength (MPa)	S.D.	Weldline strength (MPa)	S.D.
0	16.71	2.04	14.48	2.15
15	23.34	0.80	13.90	2.71
30	21.29	0.62	14.74	0.85

ตารางผนวกที่ ค3 อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีและไม่มีรอยประสานเมื่อผ่านในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

Filler content (phr)s	Tensile strength (MPa)	S.D.	Weldline strength (MPa)	S.D.
0	16.71	2.04	14.48	2.15
15	27.17	0.89	14.78	4.61
30	32.16	0.82	14.02	3.37

ตารางผนวกที่ ค4 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่ไม่มีและมียอยประสานแบบเย็นเมื่อผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

Mold temperature (°C)	Tensile strength (MPa)	S.D.	Weldline strength (MPa)	S.D.
150	29.1	0.73	29.6	1.43
160	29.6	1.43	15.8	2.8
170	27.5	0.08	14.9	7.8

ตารางผนวกที่ ค5 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์และระยะทางในการไหลที่มีต่อความแข็งแรงรอยประสานร้อนในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

Position	140 °C		150 °C		160 °C	
	Tensile strength (MPa)	SD	Tensile strength (MPa)	SD	Tensile strength (MPa)	SD
NW	33.27	0.38	32.16	0.82	29	0.65
W1	16.97	2.32	24.34	2.10	27.05	1.20
W2	20.87	3.29	24.45	2.80	26.26	1.48
W3	29.48	1.16	28.35	2.05	26.52	1.48

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ - นามสกุล	นายธนวัฒน์ ตั้งเชื่อนจันทร์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 13 สิงหาคม 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดนครสวรรค์
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ผู้ช่วยนักวิจัย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์